

KEMI-TORNION AMMATTIKORKEAKOULU TEKNIIKAN KOULUTUSYKSIKKÖ

Tutkimus tasalujan lisääineen koostumuksen vaikutuksesta hitsin
lujuuteen ja sitkeyteen Ruukin Optim 960 QC -teräksellä

Antti Balk

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Tuotantologistiikka
Insinööri (AMK)

Kemi 2011

ALKUSANAT

Saadessani tämän lopputyöaiheen tehtäväkseni, huomasin kuinka vähän aiheesta tiesin alussa. Työn edetessä oli aloitettava opiskelemaan hitsauksista ja materiaaleista itsenäisesti tietoa etsien, mutta ennen kaikkea erinomainen opastus antoi paljon käytännön ja erityisesti teorian tietotaitoa. Aihealue kasvoi työn edetessä laajaksi ja paljon lisäopittavaa aiheesta varmasti jäi. Tämä oli varmasti vain pinnan raapaisu.

Työn valmistumiseen osallistui ihmisiä pienemmällä ja suuremmalla osan otolla, joille esitänkin suuret kiitokset. Terhi Rantajärvelle joka auttoi näytteiden valmistamisessa ja toimi iskukokeissa käyttö operaattorina. Kiitokset JaloteräsStudion henkilökunta joka suoritti hitsaukset ja työskenteli koemateriaalien parissa. Mari-Selina Kantaselle kiitokset osallistumisesta lopputyön valvontaan ja kiitokset koko Compus-talon henkilökunnalle.

Suurimmat kiitokset haluan antaa lopputyössä eniten auttaneille, Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun Kimmo Keltamäelle, sekä Ruukki Metals Oy:n Sakari Tihiselle. Heidän opastuksessa on ollut helppo työskennellä ja oppia on tullut paljon.

Lopuksi haluan antaa kiitokset perheelleni ja läheisimmilleni, joilta olen saanut paljon kannustusta opiskeluilleni.

Kemissä 13.12.2011

TIIVISTELMÄ

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, Tekniikan yksikkö	
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Opinnäytetyön tekijä	Antti Balk
Opinnäytetyön nimi	Tutkimus tasalujan lisäaineen koostumuksen vaikutuksesta hitsin lujuuteen ja sitkeyteen Ruukin Optim 960 QC -teräksellä
Työn laji	Opinnäytetyö
päiväys	13.12.2011
sivumäärä	102 + 9 liitesivua
Opinnäytetyön ohjaaja(t)	DI Kimmo Keltamäki / DI Mari-Selina Kantanen, KTAMK
Yritys	Ruukki Metals Oy
Yrityksen yhteyshenkilö/valvoja	DI Sakari Tihinen, Ruukki Metals Oy

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia tasalujan lisäaineen koostumuksen vaikutusta liitoksen lujuuteen ja sitkeyteen Ruukin Optim 960 QC -teräksellä. Työssä pyrittiin selvittämään mahdollisuutta saada aikaan tasaluja hitsiliitos. Hitsauslisäaineiden piti olla kaupallisesti saatavilla ja niillä tuli olla $R_{p0.2} > 890 \text{ MPa}$ ominaisuudet.

Hitsatuille saumoille tehtiin vertaileva hitsausliitosten ominaisuustestaus. Testaukset suoritettiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun sekä Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratorioissa. Saatuja tuloksia verrattiin perusaineen mekaanisiin ominaisuuksiin. Alkuaineet selvitettiin jokaisesta langasta hitsatusta analyysipalasta.

Työ on rajattu käsittelemään Ruukin suorasammutettua ultralujaa rakenneterästä Optim 960 QC:ta ja valittuja lisäainelankoja. Hitsauksissa käytettiin neljää tasalujaa lisäainelankaa ja vertailun vuoksi yhtä selvästi alilujaa lisäainelankaa.

Saumojen hitsauksissa käytettiin samoja hitsausarvoja ja kaarienergiaa, näin saatiin liitoksista vertailukelpoisia. Hitsaukset tehtiin pulssi-MAG -menetelmällä. Hitsattujen saumojen pituus oli 1000 mm, sauma hitsattiin ensin juuresta ja sitten pinnasta.

Testaustulosten perusteella pyrittiin määrittelemään lisäaineiden vaikutus liitoksen lujuuteen ja sitkeyteen ja selvittämään jokaisen hitsatun sauman hyvät ja huonot ominaisuudet. Saatuja tuloksia voidaan käyttää hyväksi tulevaisuudessa, kun laaditaan hitsaussuosituksia ultralujille teräksille.

Asiasanat: ultraluja teräs, hitsaus, tasaluja hitsauslisäaine, aineenkoetus.

ABSTRACT

Kemi-Tornio University of Applied Sciences, Technology

Degree Programme

Mechanical and Production Engineering

Name

Antti Balk

Title

Impact of Balanced Filler Material on the Strength of Weld on Ruukki's Optim 960 QC Ultra-High-Strength Steel

Type of Study

Bachelor's Thesis

Date

13 December 2011

Pages

102 + 9 appendices

Supervisor

Kimmo Keltamäki, MSc (Tech) / Mari-Selina Kantanen, MSc (Tech.)

Company

Ruukki Metals Oy

Contact Person/Instructor

Sakari Tihinen, MSc (Tech.)

The purpose of this thesis was to examine high-strength filler materials and their impact on joint strength and ductility, when welding Ruukki's Optim 960 QC Ultra-Strength Steel. The aim of was to investigate the possibility to bring about an equal strength welding junction. Filler materials had to be commercially available and to have $R_{p0.2} > 890\text{MPa}$ Features.

Comparative testing was carried out on the welded joints. The tests were carried out in Kemi-Tornio University of Applied Sciences and Ruukki's material testing laboratories. The test results were compared with the base material properties. Elements were examined on each analyzed piece from the welded filling wire.

The work was limited to deal only with Ruukki's direct-quenched ultra-high-strength structural steel Optim 960 QC and high-strength filler materials selected to this work. In weldings four "balanced" filler materials were used and for the sake of comparison one clearly under matching filler material.

Joints were created by using the same welding parameters and arc energy so joints were comparable. Weldings were welded by using a pulsed MAG. The length of the welded joints was 1000 millimeter, the seams were welded first in the base, and then on the surfaces.

The results of the testing was to determined the effect of additives in the joint strength and ductility and to examined the good and bad features of each welded seam. The results obtained can be utilized in the future when drawing up recommendations for welding of ultra-high-strength steels.

Keywords: ultra-high-strength steel, welding, balanced filler material, material testing.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	I
TIIVISTELMÄ	II
SISÄLLYSLUETTELO.....	IV
KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET	VI
1. JOHDANTO	1
1.1. Opinnäytetyön tavoitteet	2
1.2. Tutkimus ja testaaminen	2
1.3. Hitsauskokeessa käytettävät arvot ja hitsauslisäaineet	2
1.4. Hitsaus.....	3
1.5. Hitseille tehtävät aineenkoetukset.....	4
1.6. Tulosten tarkastelu	5
2. ULTRALUJA TERÄS OPTIM 960 QC	6
2.1. Yleistä Optim 960 QC –teräksestä.....	6
2.1.1. Optim 960 QC teräksen valmistaminen	8
2.1.2. Mitta- ja muototoleranssit	10
2.1.3. Nauhalevyjen Dead Flat- käsittely eli oikaisuvalssaus	10
2.1.4. Mikrorakenne	10
2.1.5. Hiilielkvivalentti.....	11
2.1.6. Kulumiskestävyys ja kovuus.....	11
2.1.7. Aineenkoetus.....	11
2.1.8. Työstäminen	11
2.1.9. Muovaus	12
2.1.10. Leikkaus	12
2.1.11. Työturvallisuus.....	12
2.2. Ultralujien terästen hitsattavuus	13
2.2.1. Hitsausmenetelmät	14
2.2.1.1. MIG/MAG-hitsaus (Metal Inert/Active Gas welding).....	14
2.2.1.2. Pulssikaari ja pulssi -MIG/MAG-hitsaus	15
2.2.1.3. Laserhitsaus.....	18
2.3. Hitsausohje WPS.....	18
2.4. Hitsausliitosten rakenne ja ominaisuudet.....	19
2.4.1. Pehmennyt vyöhyke Optim 960 QC:lla	22
2.4.2. Heat Affected Zone	24
2.5. Tasalujat lisäaineet Optim 960QC teräkselle	25
2.5.1. Hitsausaineiden valinta	25
2.5.2. Seosaineiden vaikutus teräkseen	26
2.5.3. Opinnäytetyöhön valitut MAG-hitsauslangat ja suojakaasu.....	30
2.5.3.1. Union X 96 Ø1,2mm (tasaluja umpilanka)	30
2.5.3.2. Esab OK Aristorod 89 Ø1,2mm (umpilanka)	30
2.5.3.3. Esab OK Autrod 12.51 Ø1,2mm (aliluja umpilanka)	31
2.5.3.4. Böhler X 90-IG Ø1,2mm (umpilanka).....	32
2.5.3.5. Esab Coreweld 89 Ø1,2mm (täytelanka)	32
2.6. Suojakaasu MISON® 25.....	33

2.7.	Ohjeita lujan hitsausliitoksen saavuttamiseksi teräslajeille Optim 900 QC ja Optim 960 QC	33
2.8.	Lämmöntuonti ja sen rajoitukset Optim QC -teräksillä	34
2.8.1.	Jäähtymisaika, $t_{8/5}$	34
2.8.2.	Hitsausenergia ja lämmöntuonti	39
2.8.3.	Lämpökäsittelyn vaikutus Optim 960 QC teräksen lujuuteen ja kovuuteen	42
3.	LIITOSTEN Tarkastus ja mekaaninen AINEENKOETUS	44
3.1.	Hitsien silmämääräinen tarkastus	44
3.2.	Hitsiliitosten magneettijauhetarkistus	45
3.3.	Hitsausliitosten radiografinen kuvaus	46
3.4.	Vetokoe huoneenlämpötilassa	47
3.5.	Taivutuskoe	49
3.6.	Iskukoe	51
3.7.	Vickersin kovuuskoe	53
3.8.	Näytteen valmistus	55
3.9.	Makrohietutkimus	57
3.10.	Mikrohietutkimus	58
4.	KOKEIDEN SUORITUS	60
4.1.	Hitsien silmämääräinen tarkistus ja magneettijauhetarkistus	62
4.2.	Radiografinen kuvaus	62
4.3.	Kovuusmittauksien suorittaminen	64
4.4.	Vetokokeiden suorittaminen	65
4.5.	Iskukokeiden suorittaminen	66
4.6.	Taivutuskokeiden suorittaminen	66
5.	TULOKSET	68
5.1.	Lisäainelankojen koostumukset analyysipaloista	68
5.2.	Hitsiliitosten kovuusmittaukset	69
5.3.	Vetokokeet	72
5.4.	Iskukokeet	74
5.5.	Taivutuskokeet	75
5.6.	Makrohieet	75
6.	TULOSTEN TARKASTELU	79
6.1.	Hitsiliitosten kovuusmittaukset	79
6.2.	Vetokokeet	85
6.3.	Iskukokeet	86
6.4.	Taivutuskokeet	88
6.5.	Makrohieet	92
6.6.	Mikrorakennetarkasteluja	93
7.	YHTEENVETO	97
8.	LÄHDELUETTELO	99
9.	LIITELUETTELO	102

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

2D	Kaksidimensionaalinen
3D	Kolmedimensionaalinen
η	Terminen hyötysuhde
A ₅ (%)	Murtovenymä
Al	Alumiini
C	Hiili
CCT	Continuous Cooling Transformation, jatkuvan jäähtymisen taulukko
CEV	Hiiliekvivalentti
CG HAZ	Karkearakeinen vyöhyke
CO ₂	Hiilidioksidi
CP	Complex Phase
Cr	Kromi
Cu	Kupari
CV	Charpy-V
DP	Dual Phase
E	Hitsausenergia / kaarienergia [kJ/mm]
EDS	Energy Dispersive Spectrometry, alkuaineanalysaattori
F	Voima
F ₂ , F ₃	Hitsityypikerroin
FG HAZ	Hienorakeinen vyöhyke
FE-SEM	Field Emission-Scanning Electron Microscope, kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskooppi
HAZ	Heat Affected Zone, lämpö muutosvyöhyke
HBW	Kovuustaso
HD	Vetypitoisuus
HV	Vickers kovuusluokka
Hz	Hertz
I	Jännite
I _{av}	Jännitteen keskiarvo
IC HAZ	Osittain austenitoitunut vyöhyke
I _p	Jänniteteho
K, k	Terminen hyötysuhde
MAG	Metal active gas, aktiivinen kaasu
MIG	Metal inert gas, inerttikaasu kaasu
Mo	Molybdeeni
MPa	Megapascal
Mn	Mangaani
n	Hyötysuhde
NDT	Non destructive testing, rikkomanton aineenkoetus
Ni	Nikkeli
Nb	Niobi
P	Fosfori

pWPS	Preliminary Welding Procedure Specification, alustava hitsausohje
Q	Lämmöntuonti [kJ/mm]
QC	Quenched, Special Cold Forming, suora sammutettu, kylmä muovattava
QL	Karkaistu nuorrutusteräs
R _{eH}	Ylempi myötöraja
R _{eL}	Alempi myötöraja
R _{p0.2} Mpa	Myötölujuus
R _m	Murtolujuus MPa, [N /mm ²]
S	Rikki
SC HAZ	Karbidien palloutumisvyöhyke
Si	Pii
T&K	Tutkimus ja kehitys
T ₀	Työlämpötila °C
t ₁	Jakson pituus
t _{8/5}	Jäähtymisaika 800 °C:sta 500 °C:een
TIG	Tungsten Inert Gas Arc Welding, TIG-kaarihitsaus
U	Virta
U _{av}	Virran keskiarvo
U _{min}	Virta minimi
U _p	Virtateho
V	Vanadiini
W	Volframi
WPS	Welding procedure specification, hitsausohje

1. JOHDANTO

Rautaruukki Oyj on kansainvälinen teräs- ja konepajateollisuuden moniosaaja. Vuonna 2004 kaikki Rautaruukki-konserniin kuuluvat yhtiöt ottivat käyttöön markkinointinimen Ruukki.

2000-luvulla Ruukki alkoi panostaa vahvasti ratkaisuliiketoimintoihin eli rakentamisen ja konepajateollisuuden ratkaisuihin. Erikoisterästuotteet valittiin painopisteeksi teräслиiketoiminnassa. Tuoteperheeseen kuuluu muun muassa Raex-kulutusteräket, Optim-rakenneteräket, rakenneputket ja muut putkituotteet.

Projektissa ”Superterästen Rakenteiden Optimointi (SuRO)” tutkitaan Ruukin kuumavalssattujen nauha- ja kvarttolinjalla valmistettujen superterästen hitsattavuutta. Tämä opinnäytetyö liittyy osana tähän projektiin. Opinnäytetyössä selvitetään tasalujan lisäaineen koostumuksen vaikutusta liitoksen lujuuteen ja sitkeyteen.

Koemateriaalina on Ruukin suorasammutettu ultraluja rakenneteräs Optim 960 QC. Tornioon koemateriaalit toimitettiin valmiiksi mekaanisesti leikattuina mittaan 200x1000 mm, levyjen paksuus on 6 mm.

Kirjallisuusselvityksen perusteella valitaan tasalujista hitsauslisäaineista, ($R_{p0.2} > 890 \text{ MPa}$) opinnäytetyön tutkimukseen soveltuvimmat langat Ruukin toimesta. Eri lisäaineilla hitsatuille koemateriaaleille suoritetaan vertaileva hitsausliitosten ominaisuustestaus. Suoritettavat kokeet tehdään Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa sekä Ruukin tehtaalla Raahessa. Koemateriaalien valmistus testejä varten suoritettiin osin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulussa sekä Ruukilla Raahessa.

Onnistuneiden hitsausliitosten perusteella pyritään tekemään suosituksia ultralujien terästen hitsaukseen.

1.1. Opinnäytetyön tavoitteet

Tavoitteena on tehdä vertaileva hitsausliitosten ominaisuustestaus kaupallisesti saatavissa olevilla $R_{p0.2} > 890 \text{ MPa}$ arvot omaavilla hitsauslisäaineilla, kun tavoitteena on tehdä tasaluja hitsi.

Tähän liittyen opinnäytetyön tavoitteet päävaiheittain ovat:

- Tehdään hitsauskokeita kaupallisesti saatavilla olevilla hitsauslisäaineilla. Hitsaukseen on valittu neljä eri MAG-umpilankaa ja yksi MAG-täytelanka.
- Eri lisäaineilla hitsatuille liitoksille tehdään vertaileva mekaanisten ominaisuuksien testaus ja mekaanisten testien pohjalta kirjoitetaan opinnäytetyö.

1.2. Tutkimus ja testaaminen

Hitsattujen liitosten tutkimukset sekä koemateriaalien valmistaminen suoritetaan osin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun ja ammattiopisto Lappian tiloissa Kemissä, sekä Ruukin tehtaalla Raahessa. Suurin osa tutkimuksen tuloksista valmistui Ruukin terästehtaalla Raahessa, tämä tehtiin ajan säästämiseksi. Ruukilla koneistettiin veto- ja taivutuskoesauvat, sekä valmistettiin mikrohieet kovuusmittauksiin. Ruukki suoritti rikkovan aineenkoetuksen testit veto- ja taivutuskoesauvoille, sekä kovuuskokeet hitsisaumoista tehdyille hienäytteille. Hitsisaumoille suoritettiin myös radiograafinen kuvaus.

1.3. Hitsauskokeessa käytettävät arvot ja hitsauslisäaineet

Opinnäytetyössä tehdään hitsauskokeita kirjallisuusselvityksen perusteella löydettyistä kaupallisesti saatavilla olevista hitsauslisäaineista.

Hitsauksissa käytettiin seuraavia MAG-hitsauslisäaineita:

- Umpilangat, Union X96 Ø1,2 mm, Esab OK Aristorod 89 Ø1,2 mm, Esab OK Autrod 12.51 Ø1,2 mm ja Böhler X90-IG Ø1,2 mm.
- Täytelanka, Esab Coreweld 89
- Vertailun vuoksi valitaan yksi aliluja seostamaton hitsauslisäaine, Esab OK Autrod 12.51.

Hitsaus suoritettiin jalkoasennossa sellaiseen ilmarakoon, joka toimi hyvin hitsattaessa. Sopiva palkomäärä 6 mm levyn hitsaukseen oli 2 palkoa. Hitsauksessa ei käytetty esilämmitystä ja palkojen välinen lämpötila oli huoneenlämpötila. Hitsaukset tehtiin mahdollisimman tarkasti samoilla arvoilla kullekin lisäaineelle, jotta hitsit olisivat vertailukelpoisia. Railonvalmistuksesta ei saanut syntyä lämpövaikutusta. Pyrittiin mahdollisimman pieneen railotilavuuteen, koska mitä pienempi tilavuus sulaa materiaalia yhden hitsauksen aikana muodostuu, sitä pienempi on lämpömäärä ja vastaava pehmeneminen.

Hitsattiin kaksi 200 mm x 500 mm levyä/lanka, 50° V-railoon ilmarako noin 1 mm.

Kaarienergia $E=0,57\text{kJ/mm}$, lasketaan kaavalla MAG: $Q=k \cdot E=0,8 \cdot 0,57\text{ kJ/mm}=0,46\text{ kJ/mm}$. Hitsaukset tehtiin yhtä poltinta käyttäen jalkoasennossa ilman juuritukea, joka vastaa parhaiten käytännön tilannetta. Hitsauksista tehtiin pWPS:t, joihin merkittiin hitsauksissa käytetyt arvot. (pWPS, alustava hitsausohje). Hitsattavat levyt tuli säilyttää huoneenlämpötilassa, puhtaina ja kuivina.

1.4. Hitsaus

Hitsauskokeet suoritettiin kokonaisuudessaan Torniossa, Kemi-Tornionlaakson koulutuskuntayhtymä Lappiassa sijaitsevassa JaloteräsStudioissa. Hitsaukset suoritettiin kuvassa 32 esitetyllä MAG -hitsauskuljettimella.

1.5. Hitsille tehtävät aineenkoetukset

Hitsatuille saumoille tehtiin mekaanisten ominaisuuksien testauksia. Vetokokeet tehtiin poikittaisena kaikille hitseille. Vetokoesauvoja valmistettiin kaksi kappaletta jokaisesta hitsistä. Iskukokeet tehtiin $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$:een lämpötilassa Charpy-V 300 joulen vasaralla, iskulovien paikat määritettiin keskelle hitsiainetta, sularajalle ja sularaja + 1 mm. Yhteensä iskukoesauvoja valmistettiin 45 kappaletta ja lovien paikat merkittiin seuraavasti: VWT 0/1, VHT 0/1 ja VHT 1/1. Iskulovet tulivat koekappaleen pintaan nähden kohtisuorassa. Kovuusprofiilien määritykset tehtiin 1,5 mm etäisyydeltä perusaineen ylä- ja alapinnasta. Mittaus aloitettiin sularajalta ja mitattiin perusaineeseen asti jossa, kovuus on noin 360 HV5. Hitsiaineen ylä- ja alapinnasta tehtiin viisi mittausta. Mittapisteiden etäisyys 0,375 mm, paininvoima HV5. Mittaustuloksiin tuli näin ollen kaksi mittajanaa, pinta- ja juurimittaukset. Poikittaiset taivutuskokeet suoritettiin sekä pinta- ja juuritaivutuksina. Kaikille hitsatuille saumoille tehtiin kaksi pinta- ja kaksi juuritaivutusta. Taivutustuurnan halkaisija on $(100 \times 6) / 7 - 6 = 80\text{ mm}$ (halkaisija laskettu standardin 15614-1 kaavalla $100 \times t / A5 - t$ ja A5 arvo on otettu Optim 960 QC -teräksen datasheetiltä). Hitsisaumoista valmistettiin mikrohieet joista otettiin mikrorakenne kuvat Ruukin FE-SEM laitteistolla.

1.6. Tulosten tarkastelu

Vertaillaan eri lisäaineilla hitsattujen liitosten mekaanisia ominaisuuksia. Erityisesti kiinnitetään huomiota seostuksen vaikutukseen.

- Kovuusprofiilit.
- CV-iskusitkeys.
- Vetokoetulokset.
- Taivutuskokeet.
- Hitsisauman röntgenkuvaus.
- Mikrohieiden tutkiminen FE-SEM laitteella.
- Mikrohie näytteet valomikroskoopille.

2. ULTRALUJA TERÄS OPTIM 960 QC

Ruukin Optim QC tarjoaa samanaikaisesti erityisen korkeaa lujuutta, hyvää konepajakäsiteltävyyttä ja kohtuullista kulumiskestävyyttä. Terästen pinnanlaatu, mittojen ja muotojen tarkkuus sekä ominaisuuksien tasaisuus ovat markkinoiden parhaimmista. Käyttämällä Optim QC -terästä, voidaan rakenteita keventää, koneiden ja laitteiden kuormankantokykyä parantaa ja energiankulutusta pienentää. /14/

Tyypillisiä käyttökohteita Optim QC:lle:

- Hyötyajoneuvojen runko- ja päälirakenteet.
- Metsäkoneiden puomit.
- Nosturien puomit ja muut nostolaitteet.
- Kuormankäsittelylaitteet.
- Kuorman tuenta- ja kiinnityslaitteet.
- Syöttö- ja purkaussuppilot.
- Kontit. /14/

2.1. Yleistä Optim 960 QC –teräksestä

Optim 960 QC -teräs kuuluu ultralujien terästen ryhmään. Se tarjoaa samanaikaisesti korkeaa lujuutta, hyvää konepajakäsiteltävyyttä ja kohtuullista kulumiskestävyyttä. Ultralujaa terästä käytettäessä konstruktiomateriaalina saadaan aikaan kevyempiä konstruktioita kuin käyttämällä yleisiä rakenneteräksiä. Optim 960 QC merkinnässä numerotunnus 960 tarkoittaa teräksen myötölujuuden vähimmäisarvoa (MPa). Kirjaintunnus Q tarkoittaa karkaisua (quenching) ja kirjain C tarkoittaa kylmämuovattavaksi soveltuvaa terästä (cold formable). Optim 960 QC:n toimitustila on karkaistu (Q). Optim 960 QC:n kemiallinen koostumus on esitetty taulukossa 1, mekaaniset ominaisuudet taulukossa 2 ja hiiliiekvivalentti CEV taulukossa 3. /14/

Taulukko 1. Ruukin ultralujien terästen kemialliset koostumukset /14/

	Pitoisuus %, enintään (sulatusanalyysi)					
	C	Si	Mn	P	S	P + S
Optim 900 QC	0,10	0,25	1,15	0,020	0,010	0,030
Optim 960 QC	0,11	0,25	1,20	0,020	0,010	0,030
Optim 1100 QC	0,15	0,30	1,25	0,020	0,010	0,030

Lisäksi voidaan käyttää alumiinia (Al), niobia (Nb), vanadiinia (V), kromia (Cr), molybdeeniä (Mo) tai booria (B) yksin tai yhdistelminä.

Taulukko 2. Ruukin ultralujien terästen paksuusalueet ja mekaaniset ominaisuudet /14/

Teräslaji	Paksuusalue mm	Myötölujuus R _{p0,2} MPa Vähintään	Murtolujuus R _m MPa Vähintään	Murtovenymä A ₅ % Vähintään	Iskusitkeys pitkittäin ³⁾ t °C Charpy V J/cm ² Vähintään
Optim 900 QC ¹⁾	2,5 – 8,0	900	950	8	-40
Optim 960 QC ¹⁾	2,5 – 8,0	960	1000	7	-40
Optim 1100 QC ²⁾	2,5 – 6,4	1100	1250	6	-20

¹⁾ Myötölujuus ja murtolujuus testataan pitkittäin valssaussuuntaan nähden, mutta taataan sekä pitkittäin että poikittain. Murtovenymä testataan pitkittäin valssaussuuntaan nähden.

²⁾ Myötölujuus, murtolujuus ja murtovenymä testataan poikittain valssaussuuntaan nähden.

³⁾ Iskusitkeys testataan standardin EN 10045-1 mukaisesti Charpy V -iskukokeella. Iskusitkeysarvo 34 J/cm² vastaa arvoa 27 J testattaessa 10 x 10 mm yleiskoesauvoilla. Alle 6 mm paksuuksille ei iskukoetta tehdä.

Taulukko 3. Ruukin Optim 960 QC:n hiilielkvivalentti /14/

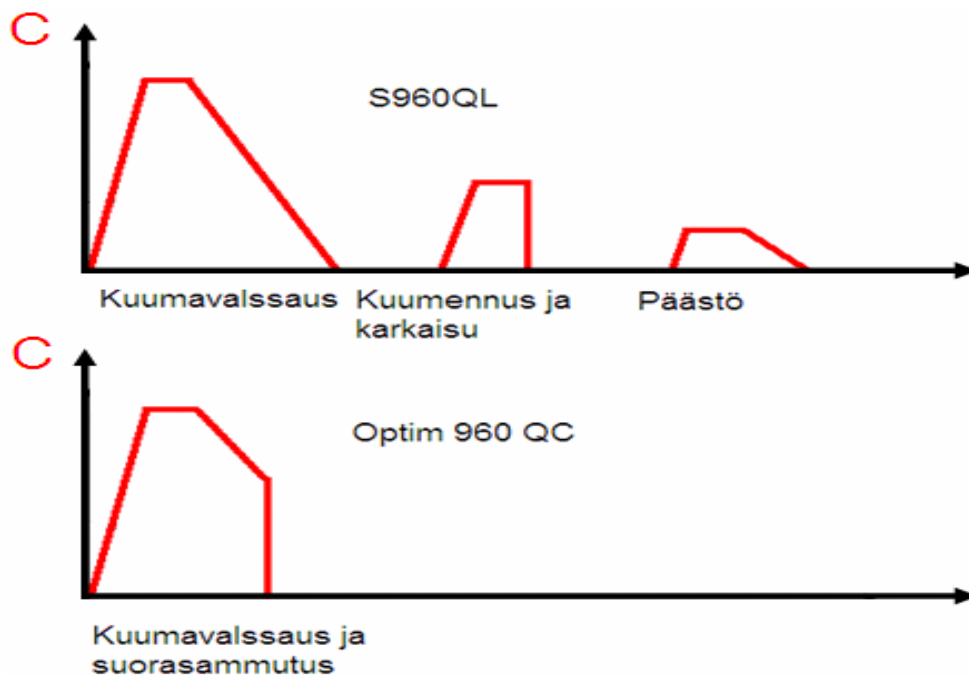
Nimike	Hiilielkvivalentti CEV tyypillinen	CEV enintään
Optim 960 QC	0,52	0,57
CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15		

Hiilielkvivalentti perustuu teräksen kemialliseen koostumukseen, ja sen avulla arvioidaan karkenevuutta ja kylmähalkeilualttiutta hitsauksessa. Hiilielkvivalentin laskemiskaavoja ja tunnuksia on monia. Yleisin hiilielkvivalenttikaava on IIW:n (International Institute of Welding) julkistama CEV-kaava taulukossa 3. /16, s. 5./

2.1.1. Optim 960 QC teräksen valmistaminen

Ruukin Optim 960 QC -teräs valmistetaan nauhavalssauslinjalla. Teräksen esivalssaus suoritetaan austeniittialueella rekristallisaatiolämpötilan yläpuolella, minkä seurauksena austeniitin raekoko saadaan hienonnettua. Tämän jälkeen suoritetaan lopullinen valssaus haluttuun paksuuteen rekristallisaatiolämpötilan alapuolella ja saadaan hieno raekoko teräsmatriisiin. Valssaaminen lopetetaan haluttuun paksuuteen ja teräsnauha jäähdytetään nopeutetusti vesijäähdytyksen avulla, jonka jälkeen nauha kelataan. Lopputuloksena on kuvan 2 mukainen bainiittis-martensiittinen mikrorakenne, jonka

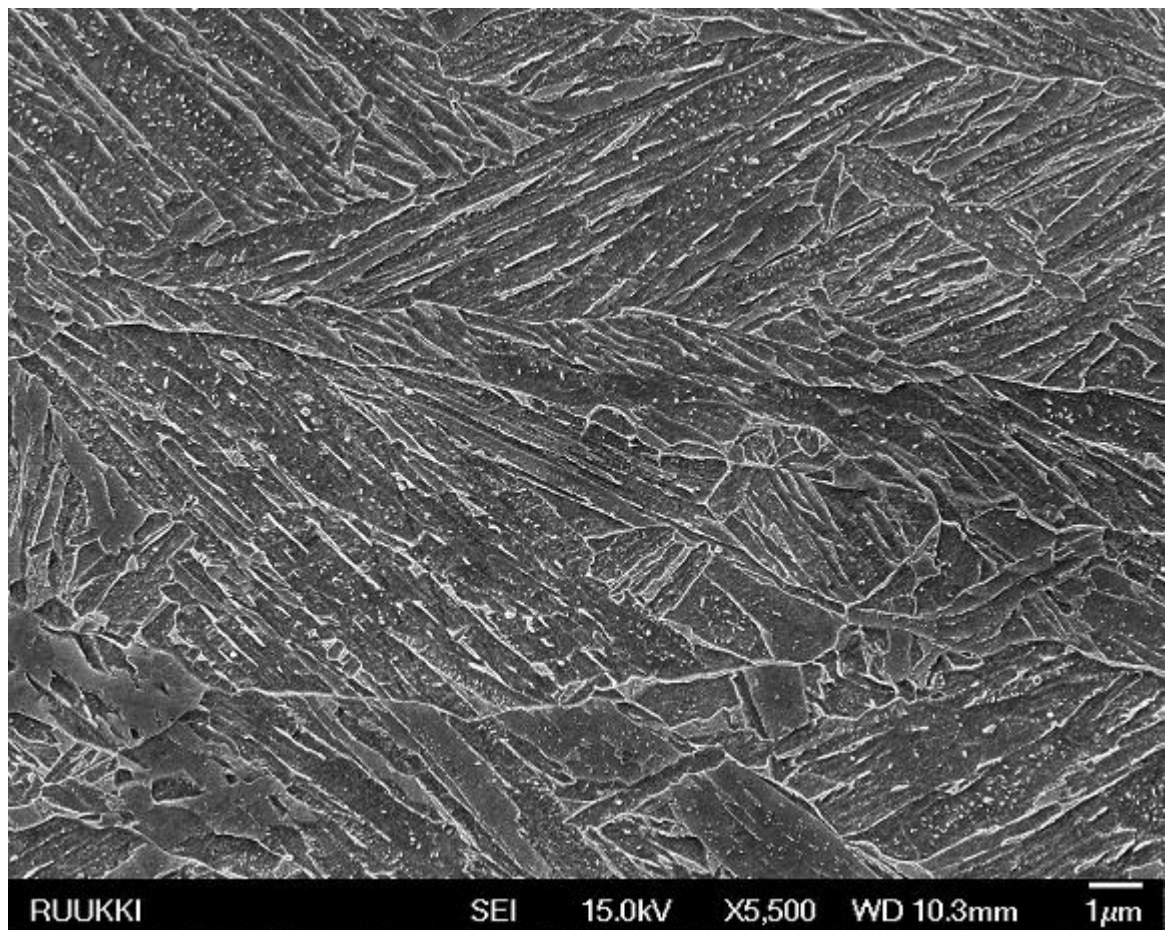
Charpy-V iskutkeys on vähintään 34 J/cm^2 $-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Nauhakela voidaan joko leikata levyiksi tai kapeammiksi rainakeloiksi, joista valmistetaan edelleen putkituotteita tai profiileja. /14/



Kuva 1. S960QL (yläkuva) ja Optim 960 QC (alakuva) -terästen prosessireitit /6/

S960 QL nuorrutusteräksen prosessireitti on monivaiheisempi kuin Optim 960 QC -teräksen. Perinteinen valmistustapa S960 QL nuorrutusteräksille on ensin termomekaaninen valssaus, levyn jäähdyttäminen ilmassa, uudelleen kuumennus austenisointilämpötilaan, karkaisu ja lopuksi teräkselle suoritetaan päästö uunissa.

Optim 960 QC -teräksen valmistaminen on kustannustehokkaampaa kuin S960 QL teräksen. Koska Optim 960 QC -teräkselle ei tarvitse tehdä erillistä karkaisua ja päästöä, toisin kuin S960 QL -teräkselle. Teräksen haluttu nimellislujuus $R_{p0.2}=960$ MPa ja muut mekaaniset ominaisuudet saavutetaan heti suorasammutuksen jälkeen. Optim 960 QC -teräksen prosessireitti mahdollistaa vähäisemmän seosaineiden käytön ja alhaisen hiilipitoisuuden. /14/



Kuva 2. Ruukin Optim 960 QC -teräksen bainiittis-martensiittinen mikrorakenne /6/

2.1.2. Mitta- ja muototoleranssit

Optim 960 QC nauhalevyjä ja keloja toimitetaan myös peitattuna. Rainojen toimittamisesta on sovittava erikseen. Levyjä saa 2,5 – 8,0 mm paksuisina ja nauhalevyjen pituusmitta on 2000–12 000 mm. Nauhalevyjen mitta- ja muototoleranssit on määritetty paksuuden, leveyden ja pituuden osalta standardissa EN 10051. Tasomaisuus standardissa EN 10029 luokka N, terästyypi H. Kelat standardissa EN 10051. Kaikkien tuotteiden toimitustila on karkaistu. /14/

2.1.3. Nauhalevyjen Dead Flat- käsittely eli oikaisuvalssaus

Dead Flat -käsittelyssä eli nauhalevyn oikaisuvalssauksessa nauhalevystä poistuvat jäännösjännitykset, ja siitä tulee erinomaisen tasomainen. Hitsausmuodonmuutosten hallinta helpottuu ja särmäyksen toistettavuus paranee. DF käsittelyn ansiosta on Optim QC -nauhalevyn pinnanlaatu entistä parempi ja pinnankarheus pienempi. Tasomainen ja jännityksetön nauhalevy lyhentää läpimenoaikaa levyprosessoinnissa. DF -käsittely merkitään aineistodistukseen. /14/

2.1.4. Mikrorakenne

Ultralujien terästen mikrorakenne on bainiittia ja martensiittia sisältävä yhdistelmärakenne. Keskimääräinen raekoko on luokkaa yksi μm . Mikrorakenteensa perusteella teräkset luokitellaan joko Dual Phase (DP) -teräksiksi tai Complex Phase (CP) -teräksiksi, koska bainiitti koostuu metallografisesti useammasta eri faasilajista. /14/

2.1.5. Hiilielkvivalentti

Hiilielkvivalenttiarvot ovat terästen korkeaan lujuuteen nähden matalia. Terästen kemialliseen koostumukseen perustuvat CEV:n tyypilliset arvot ja enimmäisarvot on esitetty taulukossa 2. /14/

2.1.6. Kulumiskestävyys ja kovuus

Karkaistujen, bainiittis-martensiittisten, Optim QC -terästen kovuus on keskimäärin hieman yli 300 HBW. Kovuustaso on kaksinkertainen S355-rakenneterästen kovuuteen verrattuna. Suuri kovuus ja korkea murtolujuus indikoivat hyvää kulumiskestävyyttä. /14/

2.1.7. Aineenkoetus

Teräslaji Optim 960 QC testataan standardin EN 10149-1:1995 (Kuumavalssatut lujat kylmämuovattavat teräslevytuotteet. Osa 1: Yleiset toimitusehdot.) mukaisesti. Niiden vetokoe ja iskukoe tehdään valssaussuuntaan nähden pitkittäisillä sauvoilla. Taivutuskoe tehdään poikittaisilla sauvoilla. /14/

2.1.8. Työstäminen

Optim 960 QC -teräksen työstämisessä tulee ottaa huomioon, että vältetään työstämistä väärissä olosuhteissa. Teräksen oikea työlämpötila, lämpövaikutukset leikattaessa ja materiaalin puhtaus ovat tärkeitä kun tavoitellaan laadullisesti hyvää hitsaussaumaa. /14/

2.1.9. Muovaus

Ultralujien terästen muovattavuus on korkeaan lujuuteensa nähden hyvä. Niitä pystyy muovaamaan kaikissa särmäyssuunnissa, ja taivutussärmän sijoittaminen on levyn valssaussuunnasta riippumaton. Pienimmät sallitut sisäpuoliset taivutussäteet paksuussittain on esitetty taulukossa 8. Taivutusvoima, takaisinjousto ja taivutussäde ovat korkeamman lujuuden mukaisesti suuremmat kuin pehmeämmillä rakenneteräksillä. Muovattavuuden täysi hyödyntäminen edellyttää terästuotteen valmistajalta hyvää konepajatekniikkaa ja tarkkaa suunnittelua. Kuluneet työkalut, puutteellinen voitelu, levyn pintanaarmut sekä heikkolaatuiset leikkausreunat huonontavat muovauksen laatua. Kylmävarastosta otetun levyn on annettava lämmetä huoneenlämpötilaan (+20 °C) ennen muovauksen aloittamista. /14/

2.1.10. Leikkaus

Ultralujat teräkset soveltuvat hyvin termisesti leikattavaksi. Leikkauspinnasta tulee sileä, mikä mahdollistaa hyvän väsymiskestävyyden. Poltto-, plasma- ja laserleikkauksessa levyn reunaan muodostuu kuumentumisen seurauksena pehmennyt vyöhyke. Sopivalla leikkausmenetelmällä vyöhyke jää hyvin kapeaksi. Lujia teräksiä mekaanisesti leikattaessa on kiinnitettävä erityishuomio leikkauslaitteiden jäykkyyteen, terien kuntoon, terävällyksiin ja leikattavan kappaleen tukemiseen. Kylmävarastosta otetun levyn on annettava lämmetä huoneenlämpötilaan (+20 °C) ennen leikkausta. /14/

2.1.11. Työturvallisuus

Ultralujien terästen käsittelyssä ja konepajatyön kaikissa vaiheissa on noudatettava erityistä huolellisuutta. Turvallisten työtapojen tärkeys korostuu erityisesti materiaalin taivutuksessa, särmäyksessä ja leikkauksessa. Teräksen toimittajan antamia käsittelyohjeita ja konepajan turvallisuusmääräyksiä on tarkoin noudatettava. Uusille työntekijöille on

ennen ultralujien terästen käsittelyä annettava asianmukainen työhön opastus materiaalin käytettävyydestä. /14/

2.2. Ultralujien terästen hitsattavuus

Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttaa hitsattavan perusaineen kemiallinen koostumus, metallurgiset ominaisuudet ja perusaineen fysikaaliset ominaisuudet. Hitsaus on perusaineelle tapahtuma, johon liittyvät nopeat lämpötilamuutokset vaikuttavat perusaineen ominaisuuksiin.

Perusaineen hitsattavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm:

Hitsattavan perusaineen kemiallinen koostumus

- karkenemistaipumus (kylmähalkeilu)
- kuumahalkeamataipumus
- haurasmurtumataipumus
- sulan käyttäytyminen

Metallurgiset ominaisuudet

- kiderakenne
- suotautumat
- sulkeumat

Fysikaaliset ominaisuudet

- perusaineen lämpöpiteneiskerroin
- perusaineen lämmönjohtavuus
- sulamispiste
- lujuus- ja sitkeysominaisuudet. /12/

Ultralujia teräksiä on helppo hitsata kaikilla tavanomaisilla menetelmillä, kun noudatetaan lujien terästen yleisiä hitsausohjeita. Esikuumennusta ei normaalioloissa tarvita, koska

levyt ovat ohuita ja terästen hiiliekvivalenttiarvot kohtuullisia. Hitsausliitoksen vetypitoisuus on pidettävä erittäin matalana, sillä kyseessä on erityisen lujan teräksen hitsaus. Railopintojen on oltava kuivat ja puhtaat hitsauksen aikana. Ultralujien terästen hitsauksessa erityishuomio on kiinnitettävä kohtuullisen lämmöntononin käyttöön ja hitsausaineiden asianmukaiseen valintaan. /14/

2.2.1. Hitsausmenetelmät

Hitsausmenetelmistä käytetyin on kaasukaarihitsaus joko umpilankaa tai täytelankaa käyttäen. Suositeltavia menetelmiä ovat myös laserhitsaus, pulssi-MAG ja laser-MAG - yhdistelmähitsaus, joka tunnetaan myös laserhybridihitsauksena. Niillä kaikilla voi hitsata pienellä ja keskitetyllä lämmöntononilla laadukkaasti. Puikkohitsaus soveltuu etenkin pieniin korjaushitsauksiin.

2.2.1.1. MIG/MAG-hitsaus (Metal Inert/Active Gas welding)

MIG/MAG-hitsaus eli metallikaasukaarihitsaus on kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä hitsauslangan ja työkappaleen välissä. Sula metalli siirtyy pieninä pisaroina langan päästä hitsisulaan. Langansyöttölaite syöttää tasaisella nopeudella hitsauslankaa hitsauspistooliin ja siitä edelleen valokaareen.

MIG- ja MAG-prosessit ovat käytännössä samanlaisia, ero niiden välillä on käytettävissä suojakaasuissa. Suojakaasu voi olla aktiivinen tai inertti kaasu. Aktiivinen kaasu reagoi sulassa metallissa olevien aineiden kanssa. Tällainen kaasu on joko puhdas hiilidioksidi (CO_2) tai argonin (Ar) ja hiilidioksidin muodostama seoskaasu, esim. 75 % Ar+25 % CO_2 . Tällaista hitsausta kutsutaan MAG-hitsaukseksi. MIG-hitsauksessa suojakaasu on puolestaan inertti eli reagoimaton kaasu, jollaisia ovat argon ja helium (He). MIG/MAG-hitsaus voidaan suorittaa erilaisilla kaarimuodoilla, joita ovat lyhyt-, seka-, kuuma- ja pulssikaari.

Pääjako näiden prosessien käytössä on sellainen, että terästen hitsaus on MAG-hitsausta ja ei-rautametallien hitsaus on MIG-hitsausta.

Lisäaine on ohut kelalla oleva lanka, jota kutsutaan usein myös umpilangaksi vastakohtana täytelangalle. Yleisimmät langanhalkaisijat ovat 1,0 mm ja 1,2 mm, mutta myös ohuempia ja paksumpia lankoja käytetään. Seostamattomat ja niukkaseosteiset teräslangat ovat yleensä pinnaltaan kuparoituja. Umpilanka vastaa koostumukseltaan perusainetta. Täytelanka taas valmistetaan kourumaisesta lanka-aihiosta, joka täytetään hitsauspuikon päällystettä vastaavalla rutiili- tai emäspäällysteellä.

Etuja ovat muun muassa jatkuva lisäaine (lanka), mekanisoinnin ja automatisoinnin helppous, kuonaton, lisäaineen korkea riittoisuus, hyvä tuottavuus, laaja hitsausarvojen säätömahdollisuus ja halpa lisäaine. Käyttöalue alkaa noin 1 mm:n aineenpaksuudesta lähtien. Hitsauslaitteisto on huomattavasti monimutkaisempi kuin puikkohitsauslaitteisto sekä vaatii enemmän huoltoa ja kunnossapitoa. MIG/MAG-hitsaus on yleisin hitsausprosessi robottihitsauksessa. /3/, /10, s. 295./

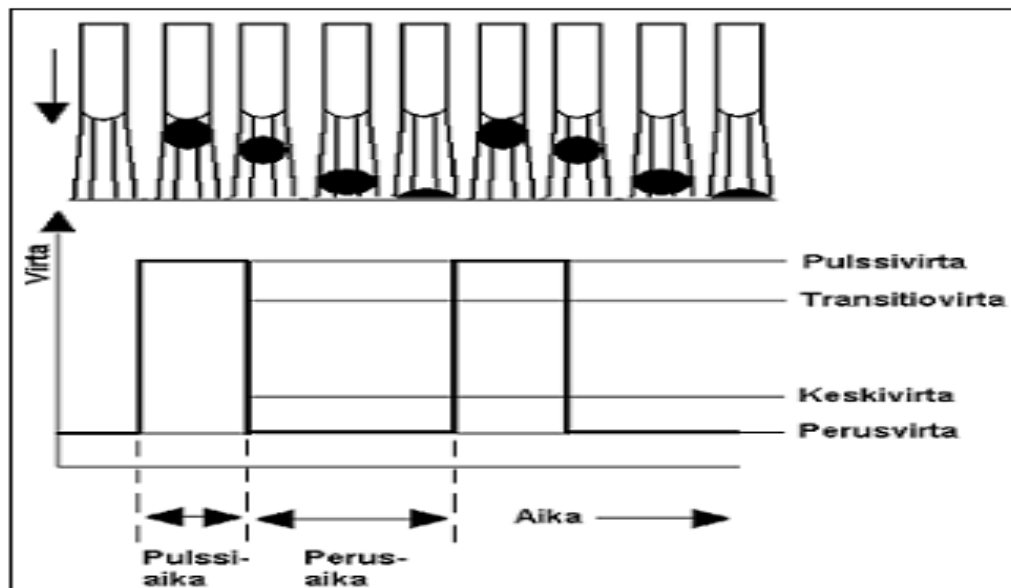
2.2.1.2. Pulssikaari ja pulssi -MIG/MAG-hitsaus

Pulssikaarella ohjataan aineensiirtymistä pulssivirran eli sykkivän virran avulla, esimerkki kuvassa 4. Sillä saadaan aikaan suihkumainen aineensiirtyminen eli kuumakaari, vaikka se ei muuten käytetyllä langanhalkaisijalla ja keskimääräisellä hitsausvirralla olisi mahdollista, vaan hitsaus niillä tapahtuisi joko lyhytkaarella tai sekakaarella. Hitsaus tapahtuu täysin ilman oikosulkuja. Tehoalue ulottuu pienistä tehoista suuriin tehoihin. Pulssikaari edellyttää inerttiä suojakaasua argon tai helium tai argonvaltaista seoskaasua. Seostamattoman teräksen hitsauksessa suojakaasun hiilidioksidipitoisuuden pitää olla alle 20 %, jotta saadaan aikaan kunnollinen pulssikaari.

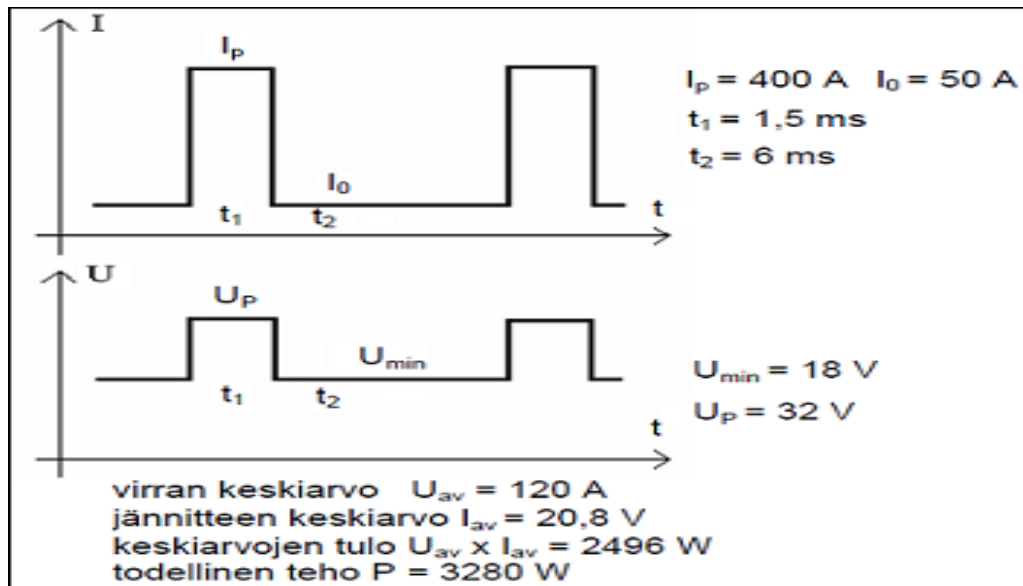
Pulssikaari saadaan aikaan syöttämällä virtapulsseja suurella taajuudella tietyn perusvirran päälle, jolloin aineensiirtyminen tapahtuu suihkumaisesti virtapulslien aikana. Jännite vaihtelee myös vastaavalla tavalla. Pulssitaajuus on noin 20–400 Hz. Huippuvirta on yleensä kaksi kertaa suurempi kuin jatkuvalla virralla hitsattaessa.

Perusvirran tehtävänä on pitää langan pää ja hitsisula sulana. Virtapulssi aiheuttaa langan sulan pään pisaroitumista ja pisan kasvamista. Samaan aikaan pinch-voima kasvaa ja irrottaa pisan, joka sinkoutuu hitsisulaan. Virta laskee takaisin perusvirran tasolle. Valokaari palaa perusvirralla, kunnes seuraava virtapulssi tulee.

Säädettäviä pulssiparametreja ovat muun muassa tauko- ja pulssivirta, pulssiaika ja taajuus. Perusvirta täytyy valita niin suureksi, ettei valokaari pääse sammumaan pulssien välillä. Huippuvirran pitää olla niin korkea ja pitkäaikainen, että säädetyllä pulssivirralla vain yksi pisara irtaakaan ilman oikosulkua ja lähtee liikkeelle riittävän suurella nopeudella. Pulssitaajuus määrittää pisan määrän aikayksikössä. Kun taajuutta nostetaan, niin pisan määrän kasvaa ja kaariteho nousee. Pulssiarvot valitaan perusaineen ja lisäaineen, aineenpaksuuden, langanhalkaisijan, suojakaasun ja virtalähteen mukaan. /13, s. 172./



Kuva 4. Pulssikaarihitsauksen periaate /13, s. 171./



Kuva 5. Pulssikaarihitsauksen virran ja jännitteen keskiarvojen, ($U_{av} \times I_{av}$) ero verrattuna todelliseen tehoon (P) /6/

Pulssi-MIG/MAG-hitsauksen etuina mainitaan usein muun muassa seuraavia asioita:

- Suurempi hitsausnopeus ja hitsiaineentuotto verrattuna lyhytkaarihitsaukseen.
- Pienempi hitsausenergia ja vetelyt verrattuna kuumakaarihitsaukseen.
- Vähemmän roiskeita.
- Vähemmän hitsaushuuruja.
- Parempi hitsin ulkonäkö.
- Paksumman langan käyttö on mahdollista.
- Helpottaa hitsausta vaikeasti hitsattavilla lisäaineilla, joita ovat mm. erilaiset nikkelivaltaiset lisäaineet. /13, s. 172./

Terästen pulssi-MAG-hitsauksessa edut tulevat parhaiten esille ohuiden aineenpaksuuksien hitsauksessa, asentohitsauksissa ja ruostumattoman teräksen hitsauksessa. Seostamattoman teräksen hitsauksessa etuna on roiskeettomuus mm. kohteissa, joissa muuten jouduttaisiin käyttämään sekakaarta. Ruostumattoman teräksen hitsauksessa pulssihitsauksen käyttö vähentää umpilangalla huokosten syntymistä hitsiin. /13, s. 172–173./

2.2.1.3. Laserhitsaus

Laserhitsaus on tärkeä teollisuuden liittämismenetelmä. Laserhitsaus mahdollistaa huomattavasti moninaisemmat liitosmuodot kuin perinteiset hitsaustekniikat ja mahdollistaa hyvin eripaksuisten komponenttien liittämisen helposti yhteen. Laserhitsausta käytettäessä valmistustekniikka ei aseta niin suuria rajoitteita kuin perinteisesti ja tuotteen suunnitteluvaihtoehdot kasvavat. Laserhitsaus on tyypillisesti huomattavasti nopeampi hitsausprosessi kuin perinteinen kaarihitsaus, mikä pienentää tuotteen hitsaus aikaa.

Laserhitsatun liitoksen laatu on yleensä vähintäänkin yhtä hyvä, usein jopa parempi, kuin perinteisillä hitsausmenetelmillä. Laserhitsatulle liitokselle on tyypillistä pienet muodonmuutokset ja liitoksen hyvä väsymis- ja vetolujuus. Hitsin nopea jäähtyminen on tyypillistä laserhitsatulle liitokselle ja se voi johtaa myös hitsin karkenemiseen. Laserhitsaus voidaan jakaa pääasiallisesti kolmeen eri tekniikkaan: avaimenreikähitsaus, sulattava laserhitsaus ja hybridihitsaus. Avaimenreikähitsaukselle on tyypillistä syvä ja kapea hitsi, pieni hitsauksen aikainen lämmöntuonti ja suuri hitsausnopeus. Sulattava laserhitsaus muistuttaa tavanomaista kaasukaarihitsausprosessia. Tämä prosessi tuottaa matalamman ja leveämmän hitsin kuin avaimenreikähitsaus. Hybridihitsauksessa käytetään laserhitsauksen ohella kaarihitsausmenetelmää, kuten TIG-, MIG/MAG- tai plasmahitsausta. /11/

2.3. Hitsausohje WPS

Hitsausohje WPS (Welding Procedure Specification) on hitsausalan sanastostandardin SFS 3052 mukaan ”asiakirja, jossa esitetään yksityiskohtaisesti tiettyyn hitsaussovellutukseen vaadittavat muuttujat toistettavuuden varmistamiseksi”. Se antaa kaikki tiedot hitsaustyöstä ja sen tekemisestä. Hitsausohje muodostaa perustan hitsaustöiden suunnittelulle, toteutukselle ja laadunvalvonnalle, jotta hitsi on vaatimusten mukainen. Hitsausohje ei vielä takaa sitä, mutta se on erinomainen työkalu hitsin laadun varmistamiseksi. Sen käyttö

vähentää myös hitsausvirheitä. Hitsausohjeen pitää olla paperilla eli WPS-kaavakkeella eikä vain ”hitsaajan päässä”. /10, s. 249–250./

Hitsausohje on laadittava niin, että jokainen ymmärtää sen sisällön. Hitsausohjeessa on oltava mm. seuraavat tiedot: yrityksen nimi, ohjeen numero ja revisio, mahdollisen menetelmäkokeen pöytäkirjan numero ja hyväksymistapa, hitsausprosessi, perusaine, aineenpaksuus, railomuoto ja railon mitoitus, hitsausasento, hitsausaineet, hitsausparametrit, hitsausenergia/lämmöntuonti, esikuumennus, palkojen välinen lämpötila ja jälkilämpökäsittely. /10, s. 250./

2.4. Hitsausliitosten rakenne ja ominaisuudet

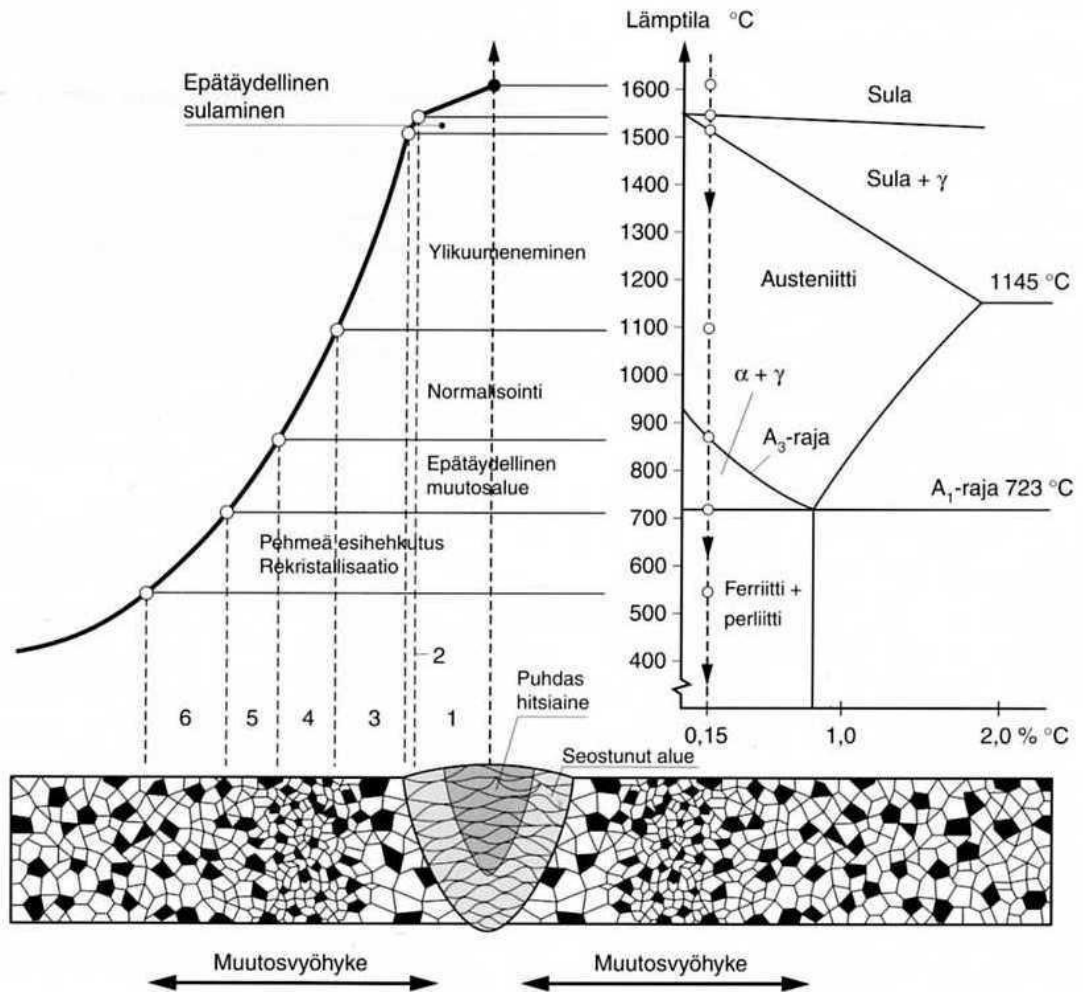
Hitsauksen aikana liitoskohdan lämpötila on ylittänyt perusaineen ja lisäaineen sulamislämpötilan, jolloin hitsin sulaneen alueen kiderakenne on muodostunut valumaiseksi. Hitsin keskialueella on puhtaan lisäaineen muodostama vyöhyke

Keskialueelta perusaineelle päin siirryttäessä tullaan lisäaineen ja perusaineen muodostamalle seostuneelle vyöhykkeelle, joka rajoittuu perusaineen sulatunkeumarajaan asti. Sekoittumisaste riippuu käytettävästä hitsausmenetelmästä, railomuodosta, hitsausparametreista sekä hitsauspalkojen lukumäärästä.

Suurilla hitsaustehoilla hitsattaessa sulatunkeumaraja siirtyy syvemmälle perusaineeseen ja sekoittuminen on suurempaa.

Kapeaa hitsausrailoa käytettäessä lisäaineen määrä jää pieneksi perusaineen osuuden kasvaessa seostumisessa.

Monipalkohitsauksessa seostuminen jää pieneksi, johtuen pienemmästä lämmöntuonnista. Hitsauksen aikana hitsausliitosalueella lämpövaikutukset muodostavat kiderakenteeltaan erilaisia alueita (kuva 6).



Kuva 6. Hitsausliitosten vyöhykkeet teräksessä, jonka hiilipitoisuus on 0,15 %. Kuvan oikealla puolella on osa rauta-hiili tasapainopiirroksesta /2/

Hitsiaineesta on erotettavissa puhdas hitsiaine ja seostunut alue, jossa perusaine ja hitsiaine ovat sekoittuneet. Sulassa tilassa olleen hitsiaineen ja jähmeänä pysyneen perusaineen muutosvyöhykkeen välissä on sularaja-alue, joka muodostuu joko kokonaan tai osittain sulana olleesta perusaineesta. /12/

Kuvan 6 vyöhykkeet:

- Vyöhyke 1: Hitsiaine, puhdasta lisäainetta sekä lisäaineen ja perusaineen seosta.
- Vyöhyke 2: Sulantunkeumaraja, missä perusaine on osittain sulanut.

- Vyöhyke 3: Karkearakeinen vyöhyke, jonka alueella austeniitin raekoko on kasvanut korkean lämpötilan (yli 1100 °C) takia.
- Vyöhyke 4: Hienorakenteinen vyöhyke, tämän alueen lämpötila on jäänyt austenoitumisalueen alaosaan ja austenoituminen on tapahtunut, mutta raekoko ei ole kasvanut. Liitoksen jäähtyessä muodostuu ferriittinen tai ferriittisperliittinen hienorakeinen ja pehmeä mikrorakenne, joka on iskutkeysominaisuuksiltaan usein alkuperäistä perusainetta parempaa. Lujien termomekaanisesti valssattujen levyjen hitsauksessa tälle vyöhykkeelle syntyy perusainetta pehmeämpi vyöhyke.
- Vyöhyke 5: Osittain austenoitunut vyöhyke. Tässä lämpötila on kohonnut 780-870 °C:een. Austenoituminen on tapahtunut vain siellä, missä austeniitin ydintyminen on ollut helppoa, siis lähinnä perliittisillä alueilla, joilla hiilipitoisuus on korkea. Yleensä osittain austenoituneet vyöhykkeet eivät ole kriittisiä, mutta nopea jäähtyminen voi korkeahiilisillä alueilla muodostaa hauraita martensiittisiä rakeita.
- Vyöhyke 6: Karbidien palloutumisvyöhyke, tällä vyöhykkeellä lämpötila on ollut 550–720 °C. Tämän vyöhykkeen ominaisuudet, eivät olennaisesti poikkea perusaineen alkuperäisistä ominaisuuksista.

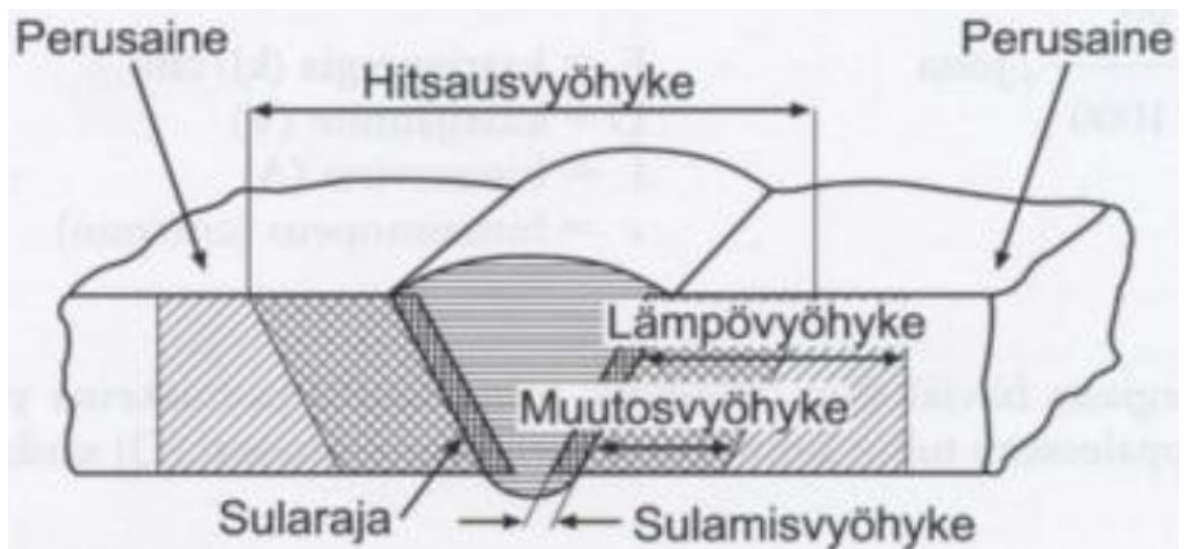
Teräksillä, joiden valmistuksessa ei ole käytetty tiivistykseen alumiinia, voi lämpövyöhykkeellä tapahtua hitsausjännityksen aiheuttaman plastisen muodonmuutoksen seurauksena myötövanhenemista. Myötövanheneminen heikentää mm. iskutkeyttä. Kunkin muutosvyöhykkeen mikrorakenne ja ominaisuudet riippuvat korkeimmasta lämpötilasta ja sen kestoajasta, hitsauksen jälkeisestä jäähtymisnopeudesta sekä perus- ja lisäaineiden kemiallisista ominaisuuksista.

Liitosalueen ominaisuuksien kannalta kriittisiä ovat sularaja, karkearakeinen vyöhyke ja suurilla hitsausenergioilla myös hitsiaine. /12/

2.4.1. Pehmennyt vyöhyke Optim 960 QC:lla

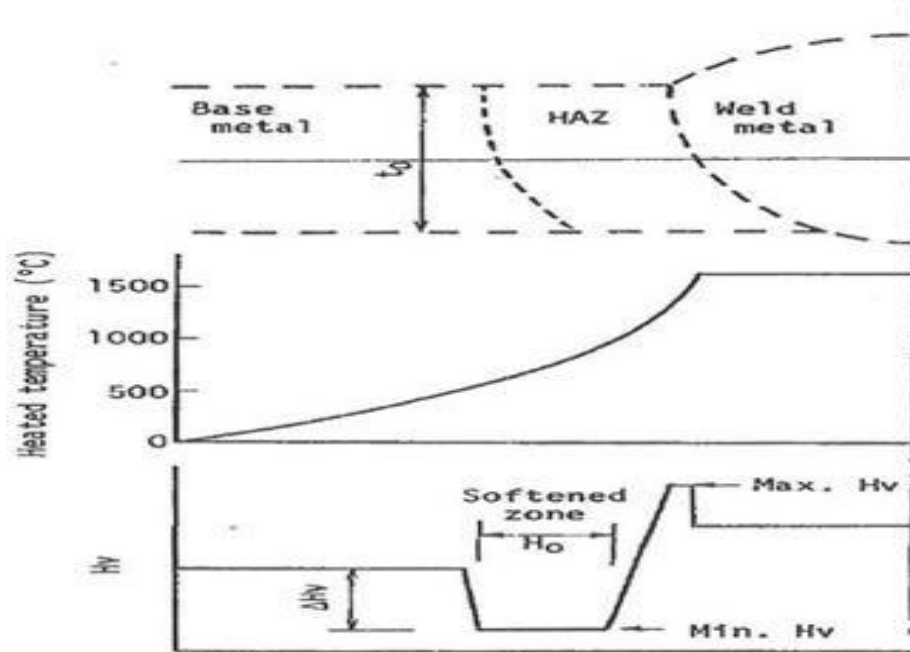
Lämmöntuonnin asianmukainen rajoittaminen on tärkeää, sillä erityisesti suurilla lämmöntuonneilla hitsausliitokseen muodostuu perusainetta pehmeämpi vyöhyke. Vyöhyke sijaitsee hitsausliitoksen muutosvyöhykkeellä (HAZ = Heat Affected Zone) (kuva 7). Vaikka tämä vyöhyke on kapea, on se otettava huomioon rakennetta ja hitsausta suunniteltaessa. Hitsausliitosten sijoittamista rakenteen rasitetuimpiin kohtiin on vältettävä.

/1/

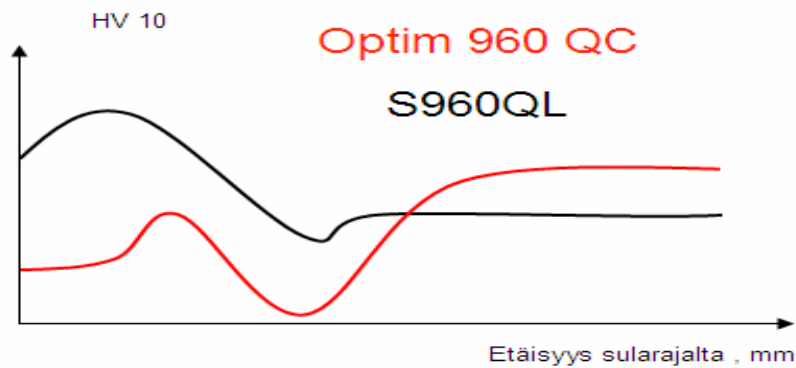


Kuva 7. Hitsausvyöhykkeet (Heat Affected Zone) /10/

Kun teräksen hiilipitoisuus C, hiiliekvivalentti CEV ja jäähtymisaika $T_{8/5}$ tunnetaan, voidaan hitsille määrittää optimaalinen jäähtymisaika-alue, jolloin hitsiliitoksen kovuus jää hyväksyttävälle tasolle. Liian hidas jäähtyminen aiheuttaa muutosvyöhykkeeseen sitkeyttä heikentävää rakeenkasvua mikä pienentää liitoksen kovuutta ja lujuutta. Pehmennyt vyöhyke syntyy HAZ:iin osittaisen austenisoitumisen, karbidien palloutumisen ja päästymisen seurauksena. /24/



Kuva 8. Softened zone (H_0), Pehmeän vyöhykkeen tulee olla riittävän kapea, jotta liitoksen lujuus ei kärsi /23/



Kuva 9. Skemaattinen esitys Optim 960 QC ja S960 QL -terästen HAZ:n kovuusprofiilista, kun liitosten laskennallinen $T_{8/5}$ -aika on sama. Alilujuus korostuu Optim 960 QC teräksen hitsausliitoksessa S960QL -teräkseen verrattuna /23/

2.4.2. Heat Affected Zone

Ultralujalla teräksellä hitsausliitoksesta löytyvät samat vyöhykkeet kuin yleisellä rakenneteräksellä, mutta mikrorakennemuutokset ovat erilaiset. Hitsausliitoksen iskutkeysominaisuuksien kannalta kriittinen alue on yleensä karkearakeinen vyöhyke, jossa austeniitin raekoko on kasvanut korkean lämpötilan takia. Liitoksen pehmeneminen ultralujalla Optim 960 QC -teräksellä johtuu rakeenkasvusta karkearakeisella vyöhykkeellä (CG HAZ), karbidien muodostumisesta osittain austenitoituneelle vyöhykkeellä (IC HAZ), karbidien palloutumisesta ja päästöstä perusaineen puolella, kun lämpötila on yli 500 °C. Optim 960 QC:n mikrorakenne on bainiittis-martensiittinen. /24/

Muutosvyöhyke voidaan jakaa tarkemmin osa-alueisiin, joista karkearakeinen, osittain austenisoitunut sekä karbidien palloutumisvyöhyke ovat yleensä niin sanottuja mis-match alueita.

- Karkearakeinen vyöhyke (CG HAZ), jolloin lämpötila on ollut 1100 – 1500 °C.
- Hienorakeinen vyöhyke (FG HAZ), jolloin lämpötila on ollut 850–1100 °C.
- Osittain austenitoitunut vyöhyke (IC HAZ), jolloin lämpötila on ollut 750–850 °C.
- Karbidien palloutumisvyöhyke (SC HAZ), jolloin lämpötila on ollut 600–750 °C.

Mis-match- vyöhykkeellä tarkoitetaan sellaista paikallista vyöhykettä, jonka lujuus- ja sitkeysominaisuudet poikkeavat perusaineen ominaisuuksista. Tämä vyöhyke voi olla aliluja, yliluja tai tasaluja. Hitsausliitoksessa mis-match vyöhyke on joko hitsiaine tai yksi tai useampi muutosvyöhykkeen osa. Aliluja vyöhyke on tällöin aliluja hitsiaine tai pehmennyt vyöhyke perusaineen muutosvyöhykkeessä. Paikallinen alilujuus korostuu yleensä teräksen lujuuden kasvaessa. /24/

2.5. Tasalujat lisäaineet Optim 960QC teräkselle

Mikäli hitsausliitoksen lujuusominaisuudet on suunniteltu lähelle perusaineen lujuutta, on käytettävä tasalujia hitsausaineita. Tasalujiksi hitsausaineiksi Optim 900 QC ja 960 QC - teräksille suositellaan standardien EN 757 ja EN ISO 16834 mukaisia hitsauslisäaineita joiden myötölujuusluokka on 89 ($R_{p0.2} \geq 890\text{Mpa}$) ja iskutikeysluokka 4-6 (CV iskuenergia $\geq 47\text{J}/-40^{\circ}\text{C}$). Standardien mukaisia tasalujia hitsausaineita ja lähes vaatimukset täyttäviä hitsausaineita ovat esimerkiksi taulukon 5 esittämät tuotemerkit. /14/

Taulukko 5. Tasalujat tai lähes tasalujat hitsausaineet Ruukin Optim 960 QC:lle /16/

Umpilangat	Täytelangat
Union X 90	Stein-Megafil 1100 M
Union X 96	Stein-Megafil 807 M
Böhler X 90-IG	Stein-Megafil 807 B
Esab OK Aristorod 89	Stein-Megafil 745 B
Fliess ED-FK 1000	Filarc PZ6149
Midalloy ER120S-G	Esab Coreweld 89
Midalloy ER4130	
Elgamatic 138	
Lincoln LNM MoNiCr	

2.5.1. Hitsausaineiden valinta

Hitsausaineet valitaan hitsattavan rakenteen asettamien vaatimusten mukaisesti. Hitsausaineen valintaan vaikuttavat myös käytettävä liitosmuoto ja hitsausasento. Ultralujien terästen hitsauksessa voi valita joko tasalujia (”matching”) hitsausaineita tai perusainetta pehmeämpiä, ns. alilujia (”undermatching”) hitsausaineita. Ultralujien terästen hitsauksessa on hitsin vetypitoisuuden pysyttävä erityisen matalana, $HD \leq 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$. Tämän takia yksinomaan matalan vetypitoisuuden tuottavia hitsausaineita saa käyttää hitsauksessa. /14/

2.5.2. Seosaineiden vaikutus teräkseen

Lisäämällä eri määriä eri seosaineita, voidaan terästen ominaisuuksia muuttaa huomattavasti. Tämä koskee sellaisia ominaisuuksia kuten karkenevuus, kuumalujuus, päästön-, kulumisen-, korroosion- ja hapettumiskestävyys. Taulukossa 6 on kuvattu yleisempien seosaineiden vaikutusta teräksien hitsattavuus ominaisuuksiin. Seosaineiden tarkempi käyttäytyminen on selvitetty liitteissä (3/1), (3/2), (3/3). /12/

Taulukko 6. Seosaineiden vaikutus teräkseen (+) parantaa ominaisuuksia, (-) heikentää ominaisuuksia /12/

Seosaine	Lujuus	Sitkeys	Kuumalujuus Virumislujuus	Hitsattavuus
Hiili (C)	+	-	+	-
Pii (Si)	+	-	+	+
Mangaani (Mn)	+	+		+
Fosfori (P)	+	-	+	-
Rikki (S)	-	-	-	-
Molybdeeni (Mo)	+	-	+	-
Kromi (Cr)	+	-	+	-
Nikkeli (Ni)	+	+	+	+
Alumiini (Al)	+	+		+
Niobium (Nb)	+	+	+	+
Vanadiini (V)	+	+	+	+

Hiili (C)

Lisää teräksen lujuutta, karkenevuus lisääntyy hiilipitoisuuden lisääntyessä teräksen seosaineena. Hiili sulaa 3632 °C :n ja kiehuu 4800 °C :n lämpötilassa. Hiili kestää korkeita lämpötiloja, mikäli happea ei ole läsnä. Hiili lisää teräksen lujuutta, karkenevuus lisääntyy hiilipitoisuuden lisääntyessä teräksen seosaineena.

Seostamaton teräs on hyvin hitsattavaa, jos hiilipitoisuus on alle 0,25 %. Hiilipitoisuuden ollessa yli 0,25 % hitsausjännitykset voivat aiheuttaa karkenemishalkeamia ja murtumia. Jäähdytystä voidaan hidastaa ja karkenemistä estää esilämmityksellä ja jälkihehkutuksella. Hitsausohjeessa (WPS) määritetään lämpökäsittelyt, käytettävät lisäaineet ja hitsausenergiat.

Pii (Si)

Lisää teräksen kovuutta ja lujuutta, mutta heikentää iskusitkeyttä. Piin sulamispiste on 1420 °C. Piin tiheys on 2,4 kg/dm³. Pii on tavallinen teräksen tiivistysaine. Jos rakenneteräs sisältää piitä noin 0,4 %, on se varmasti tiivistettyä. Piin sijasta terästä voidaan tiivistää alumiinilla tai titaanilla.

Piin atomit hylkivät hiiltä eivätkä siksi asetu teräksessä sementtiittikiteisiin. Pii lisää teräksen kovuutta ja lujuutta, mutta heikentää iskusitkeyttä.

Mangaani (Mn)

Mangaanin sulamispiste on 1260 °C. Mangaanin tiheys on 7,2 kg/dm³. Mangaania lisätään kaikkiin teräksiin mellotusvaiheen jälkeen ylimääräisen hapen poistamiseksi. Mangaani on hiilen jälkeen yleisin terästen seosaine. Mangaaniatomit yhtyvät helposti hiileen ja pyrkivät siten asettumaan teräksissä sementtiittikiteisiin. Vähähiilisissä teräksissä suurin osa mangaania asettuu ferriitin hilaan rautaa korvaten.

Mangaani lisää terästen kovuutta ja lujuutta yli 10 % mangaania sisältävien terästen rakenne on austenointihehkutuksen ja sammutuksen jälkeen austeniittinen. Tällainen austeniitti työstökarkenee iskumaisen muokkauksen vaikutuksesta martensiitiksi ja sitä käytetään esim. maarakennuskoneiden kauhojen huulilevyinä.

Fostori (P)

On haitta-aine, jota jää teräkseen malmista ja romusta. Fosfori haurastaa terästä kylmänä ja heikentää teräksen iskusitkeyttä. Halvimmissa hitsattavissa teräksissä fosforin enimmäismäärä on rajoitettu noin 0,05 prosenttiin. Useimpien terästen fosforipitoisuus on 0,01-0,03 %.

Rikki (S)

On haitta-aine, jota jää teräkseen malmista ja romusta sulatuksen yhteydessä. Rikki lisää teräksessä ns. kuumahaurautta ja aiheuttaa hitsiin kuumahalkeamia. Halvimmissa teräksissä rikin enimmäismäärä on rajoitettu 0,05 prosenttiin. Käytännössä useimpien terästen rikkipitoisuus on 0,01-0,03 %.

Rikin haittavaikutukset estetään mangaanilisäyksen avulla. Jos teräksessä ei olisi mangaania seosaineena, pitäisi rikkipitoisuuden ylärajan olla vieläkin matalampi.

Molybdeeni (Mo)

Lisää teräksen lujuutta ja sitkeyttä. Molybdeeni on seosaineena kuumalujissa teräksissä joiden käyttölämpötila on 400–500 °C. Molybdeenin sulamispiste on 2610 °C. Molybdeenin tiheys on 10,2 kg/dm³. Noin 0,5 % molybdeeni seostus yhdessä kromiseostuksen kanssa parantaa myötölujuutta ja virumislujutta.

Seostamalla austeniittiseen ruostumattomaan teräkseen molybdeenia noin 2,5 % saadaan tulokseksi haponkestävää terästä. Molybdeeni parantaa syöpymiskestävyyttä pelkistävissä oloissa.

Kromi (Cr)

Lisää teräksen vetolujuutta ja kovuutta, mutta vähentää sitkeyttä. Kromiatomit yhtyvät helposti hiileen, kromi koventaa sementtiittiä ja parantaa siten esim. työkaluterästen kulumiskestävyyttä. Kromin sulamispiste on 1907 °C

Kupari (Cu)

Kuparin tiheys on 8,93 kg/dm³. Kuparin sulamispiste on 1084,62 °C. Kuparin tärkeimpiä ominaisuuksia hitsauksen kannalta ovat:

- Suuri lämmönjohtavuus: huoneenlämmössä kuusinkertainen ja 1000 °C:ssa noin kymmenkertainen teräkseen verrattuna.
- Noin 50 % suurempi lämmönpitenemiskerroin kuin teräksellä.

Kuparimetalleja käytetään erilaisten säiliöiden, putkistojen, lämmönvaihtimien yms. laitteiden rakennemateriaaleina. Säännestävien terästen seosaineena käytetään pieniä määriä kuparia, kromia ja nikkeliä. Näillä seosaineilla saadaan hyvä ilmastokorroosiokestävyys.

Nikkeli (Ni)

Parantaa teräksen sitkeyttä sekä pakkasessa että korkeissa lämpötiloissa. Nikkeli lisää lujuutta ja lievästi karkaisusyvyyttä. Runsaasti nikkelseosteinen teräs on kylmänäkin austeniittinen, esimerkkinä austeniittiset ruostumattomat teräkset. Nikkelin sulamispiste on 1455 °C. Nikkelin tiheys on 8,9 kg/dm³.

Alumiini (Al)

On esim. valuterästen tavallinen tiivistysaine. Alumiiniseostuksella voidaan vähentää haitallista hitsauksen yhteydessä tapahtuvaa myötövanhenemistaipumusta, jotta tyyppi ferriitin hilaan liuenneena aiheuttaa. Alumiinin sulamispiste on 658 °C. Alumiinin tiheys on 2,69 kg/dm³.

Niobi (Nb)

Lisäämällä niobia teräkseen muodostaa se niobikarbideja ja niobinitridejä teräksen rakenteeseen. Nämä yhdisteet parantavat teräksen sitkeyttä, lujuutta, muokattavuutta ja hitsattavuutta. Niobia käytetään lähinnä seosmetallina erikoisteräksissä, joita käytetään esimerkiksi kaasuputkissa. Vaikka seokset sisältävät niobia enintään 0,1 prosenttia, sillä on jo merkittävä vaikutus teräksen lujuuteen. Niobin sulamispiste on 2477 °C. Niobin tiheys on $8,57 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Vanadiini (V)

On tavallisin ns. hienoraeseosaine hitsattavissa rakenneteräksissä. Jo pieninäkin seospitoisuuksina vanadiini estää karkearakeisuuden muodostumisen hitsissä. Vanadiini lisää teräksen lujuutta korkeissa lämpötiloissa heikentämättä sitkeyttä. Vanadiinin sulamispiste on 1900 °C. Vanadiinin tiheys on 6,11 kg/dm³. /12/

2.5.3. Opinnäytetyöhön valitut MAG-hitsauslangat ja suojakaasu

Lisäainelankojen halkaisija on 1,2 mm. Yhteensä tehdään 5 hitsiä. Vertailun vuoksi yksi aliluja seostamaton lisäaine mukaan testeihin, Esab OK autrod 12.51. Projektin ainoana täytelankana on Esab Coreweld 89.

Kaikista langoista hitsattiin standardin SFS-EN ISO 6847 mukaiset analyysipalat, joista selvitettiin hitsausaineiden tarkempi koostumus. Tutkimukset suoritti Ruukki. Lisäainelankojen koostumukset on esitetty taulukossa 19.

2.5.3.1. Union X 96 Ø1,2mm (tasaluja umpilanka)

Union X 96 on luokiteltu G 89 5 M Mn4Ni2,5CrMo mukainen kohtalaisesti seostettu umpilanka nuorrutettujen hienorakeisten nosturi- ja ajoneuvoteollisuuden rakenneterästen hitsaukseen. Omaa hyvän muodonmuutoskyvyn huolimatta erittäin suuresta lujuudesta. Hyvä vastustuskyky kylmähalkeamista vastaan langan puhtaudesta johtuen. Hitsausvirta DC+. Suojakaasu M21.

Taulukko 7. Union X 96 kemiallinen koostumus (Ainestodistus)

Lanka	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
Union X96	0,12	0,8	1,9	0,45	2,35	0,55

Taulukko 8. Union X 96 mekaaniset ominaisuudet

Lanka	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	KV +20C (J)	KV -40C (J)	KV -50C (J)
Union X96	930	980	14	80	-	50

2.5.3.2. Esab OK Aristorod 89 Ø1,2mm (umpilanka)

OK Aristorod 89 on luokiteltu G 89 4 M Mn4Ni2CrMo mukainen kuparoimaton matalaseostettu umpilanka ultralujien terästen hitsaukseen vaativiin kohteisiin. Soveltuu

myös kohteisiin, joissa vaaditaan matalanlämpötilan iskusitkeyttä. Langalla voidaan hitsata korkeilla virta-arvoilla, ilman häiriötä langansyötössä, vähemmällä roiskeilla ja vakaalla valokaarella. Tämä aikaansaadaan uudella ASC pintakäsittelyllä (Advanced Surface Characteristics). Suojakaasu M21

Taulukko 9. Esab OK Aristorod 89 kemiallinen koostumus (Ainestodistus)

Lanka		C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	V (%)	Cu (%)	Al (%)	Ti (%)
OK AristoRod 89	min	0,08	0,6	1,6	0,25	2,1	0,45				
	max	0,12	0,9	2,1	0,45	2,3	0,65	0,03	0,15	0,03	0,15

Taulukko 10. Esab OK Aristorod 89 mekaaniset ominaisuudet

Lanka	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	KV +20C (J)	KV -40C (J)	KV -50C (J)	KV -60C (J)
OK AristoRod 89	920	1000	18	-	60	-	-

2.5.3.3. Esab OK Autrod 12.51 Ø1,2mm (aliluja umpilanka)

OK Autrod 12.51 on kuparoitu, seostamaton yleislanka seostamattomien rakenneterästen ja hienoraeterästen MAG-hitsaukseen. Lanka soveltuu mm. seostamattomille yleisille rakennusteräksille ja paineastiateräksille, laivanrakennusteräksille ja hienoraeteräksille, kun myötölujuusvaatimus on enintään 420 N/mm². Lanka on saatavissa myös Marathon Pac™-suurpakkauksessa mekanisoituun ja robotisoituun hitsaukseen. Suojakaasu, seoskaasu M21/M20 tai CO2. Hitsausvirta DC(+).

Taulukko 11. Esab OK Autrod 12.51 kemiallinen koostumus (Ainestodistus)

Lanka	C (%)	Si (%)	Mn (%)
OK Autrod 12.51	0,1	0,9	1,5

Taulukko 12. Esab OK Autrod 12.51 mekaaniset ominaisuudet

	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)		KV +20°C (J)	KV -20°C (J)	KV -30°C (J)
Lanka			A5 (%)			
OK Autrod 12.51	470	560	26	130	90	70

2.5.3.4. Böhler X 90-IG Ø1,2mm (umpilanka)

Böhler X 90-IG on luokiteltu G 89 6 M Mn4Ni2CrMo mukainen matalaseostettu umpilanka lujien (Rp minimi 890 MPa), lämpökäsiteltyjen, hienorakeisten rakenneterästen hitsaukseen. Mikrooseostuksesta johtuen lanka omaa erinomaisen muokkaantumiskyvyn ja sillä on hyvä vastustuskyky halkeamia vastaan korkeasta lujuudesta huolimatta. Hyvä iskuenergia kylmissä lämpötiloissa aina -60 °C asti. Suojakaasu Ar + 15–25 % CO₂.

Taulukko 13. Böhler X 90-IG kemiallinen koostumus (Ainestodistus).

Lanka	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
Böhler X 90-IG	0,1	0,8	1,8	0,35	2,25	0,6

Taulukko 14. Böhler X 90-IG mekaaniset ominaisuudet.

Lanka	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	KV +20C (J)	KV -40C (J)	KV -50C (J)	KV -60C (J)
Böhler X 90-IG	915	960	20	130	-	-	47

2.5.3.5. Esab Coreweld 89 Ø1,2mm (täytelanka)

Esab Coreweld 89 on luokiteltu EN ISO 16834-A: G 89 4 Z M M 2 H5 mukainen metallitäytelanka, jonka täyte koostuu pääasiassa rautajauheesta ja seosaineista. Suojakaasu M20 ja M21. /21/

Taulukko 15. Esab Coreweld 89 kemiallinen koostumus (Ainestodistus).

Täytelanka	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
Esab Coreweld 89	0,1	0,8	1,3	0,6	2,5	0,7

Taulukko 16. Esab Coreweld 89 mekaaniset ominaisuudet.

	Rp0.2 (MPa)	Rm (MPa)	A5 (%)	KV -40°C (J)
Täytelanka				
Esab Coreweld 89	930	995	19	90

2.6. Suojakaasu MISON® 25

Kemiallinen koostumus, Ar 25 % CO₂ + 0,03 % NO. Soveltuu seostamattomien ja niukkaseosteisen terästen MAG-hitsaukseen umpilangoilla ja täytelangoilla. Antaa lyhytkaarella juoksevan, hyvin hallittavan sulan. Kuumakaarella kestää epäpuhtauksia paremmin kuin muut seoskaasut. Roiskeenmuodostus on vähäisempää, hitsin liittyminen perusaineeseen on parempi ja hitsausnopeus on suurempi verrattuna hiilidioksidiin. Seoskaasuista sillä on suurin hapettavuus, minkä johdosta myös kuonanmuodostus on voimakkainta. Suositellaan erityisesti lyhytkaarihitsaukseen. Poistaa hitsauksen aikana syntyvää haitallista otsonia. Merkintä; EN ISO 14175-Z-ArC+NO-25/0,03. Vastaa ryhmää M21. /1/

2.7. Ohjeita lujan hitsausliitoksen saavuttamiseksi teräslajeille Optim 900 QC ja Optim 960 QC

Mikäli halutaan perusaineen kanssa mahdollisimman tasaluja hitsausliitos, on rajoitettava hitsauksen lämmöntuonnin päästövaikutusta HAZ:ssa. Seuraavat toimenpiteet edistävät tavoitteen saavuttamista:

- Suositaan pienen lämmöntuonnin menetelmiä, kuten laserhitsaus, pulssi-MAG ja laser-MAG.
- Suunnitellaan jäähtymisaika 800 °C:sta 500 °C:een ($t_{8/5}$) siten, ettei se ylitä 4 sekuntia.
- Pyritään mahdollisimman pieneen railotilavuuteen. Mitä pienempi tilavuus sulaa materiaalia yhden palon hitsauksen aikana tuodaan, sitä pienempi on lämpömäärä ja vastaava pehmeneminen. Esimerkiksi päittäishitsin viistekulmaksi V-railoissa suositellaan enintään 50°:ta, kun levypaksuus on yli 4 mm.
- Käytetään monipalkohitsauksessa palkojen välisenä lämpötilana huoneenlämpötilaa (+20 °C).
- Pidetään hitsattavat levyпиннат puhtaina, kuivina ja vähintään huoneenlämpötilassa, jolloin esilämmitystä ei tarvita.

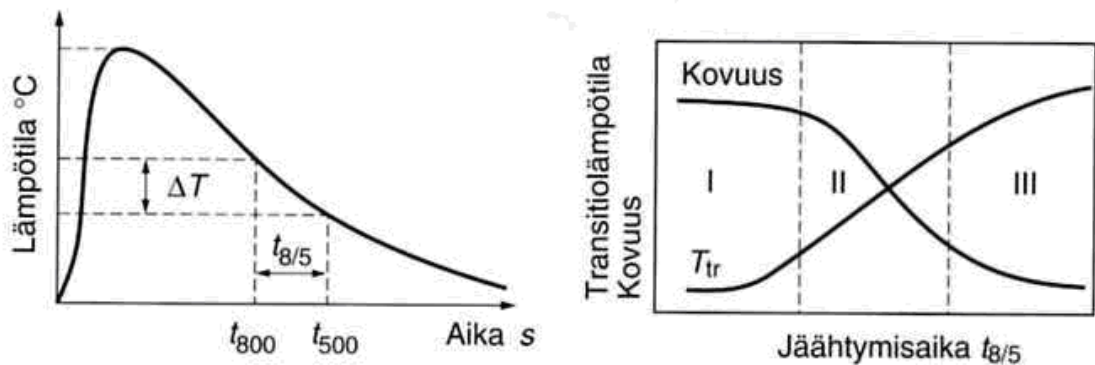
- Käytetään standardien EN 757 ja EN ISO 16834 mukaisia hitsauslisäaineita joiden myötölujuusluokka on 89.

2.8. Lämmöntuonti ja sen rajoitukset Optim QC -teräksillä

Optim 960 QC:lle suositeltavat lämmöntuonnit ovat paljon pienempiä kuin esimerkiksi yleisille rakenneteräksille annetut suositukset. Hitsattaessa liian suurella lämmöntuonnilla hitsin vieressä olevan muutosvyöhykkeen (ICHAZ) kovuus pienenee päästöilmiön seurauksena. Liian pienellä lämmöntuonnilla hitsattaessa jäähtyminen tapahtuu nopeammin ja materiaali karkenee entisestään. Seuraavissa alaotsikoissa käsitellään tarkemmin lämmöntuontia ja sen rajoituksia.

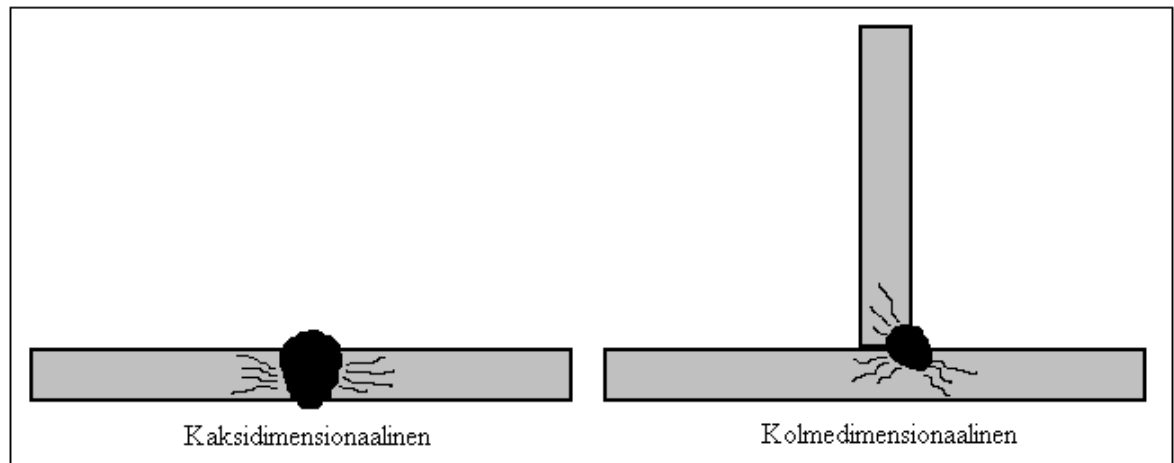
2.8.1. Jäähtymisaika, $t_{8/5}$

Hitsausliitoksen ominaisuudet riippuvat oleellisesti hitsin jäähtymisnopeudesta, jonka suuruuteen vaikuttavat lämmöntuonti, aineenpaksuus sekä mahdollinen esikuumennus ja välipalkkolämpötila. Hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen kiderakenteen kannalta merkittävimmät muutokset tapahtuvat liitoksen jäähtyessä lämpötilavälillä 800 – 500 °C. Tästä johtuen jäähtymisajan kuvaajana käytetään jäähtymisaikaa $t_{8/5}$, (kuva 12). Tämä tarkoittaa lämpötilan putoamiseen käytettyä aikaa sekunteina välillä 800 – 500 °C. /24/



Kuva 12. Jäähtymisaika $t_{8/5}$ (vasemmalla) ja sen vaikutus muutosvyöhykkeen kovuuteen ja iskusitkeyden transitiolämpötilaan (oikealla) /12/ /15/

Jäähtymisen yhteydessä on erotettavissa kaksi erilaista lämmönjohtumistyyppiä, kaksi – ja kolmedimensionaalinen jäähtyminen. Kuvassa 13 on esitetty 2- ja 3-dimensionaaliset jäähtymiset. /30/



Kuva 13. Kaksidimensionaalinen (2D) ja kolmedimensionaalinen (3D) jäähtyminen
/2/

Kaksidimensionaalisessa jäähtymisessä lämmönjohtumista tapahtuu vain kappaleen tasossa, silloin hitsattavan kappaleen aineen paksuus vaikuttaa jäähtymisaikaan jolloin kaksidimensionaalisessa jäähtymisessä, jäähtymisaika $t_{8/5}$ voidaan laskea kaavalla 1. /2/

$$t_{\frac{8}{5}} = (0,67 - 5 \times 10^{-4} \times T_0) \eta \times E \left(\frac{1}{500 - T_0} - \frac{1}{800 - T_0} \right) F_3 \quad (1)$$

missä

$t_{8/5}$ = jäähtymisaika (s)

T_0 = työlämpötila (°C)

η = termien hyötysuhde

E = hitsausenergia (kJ/cm)

F_3 = hitsityyppikerroin

Kolmedimensionaalinen jäähtyminen tapahtuu lähinnä paksuissa kappaleissa. Kolmedimensionaalisessa jäähtymisessä lämmönjohtuminen voi tapahtua sekä kappaleen

tasossa että kappaleen paksuussuunnassa. Kolmedimensionaalisen jäähtymisen yhteydessä kappaleen aineenpaksuus ei vaikuta tapahtuvaan jäähtymisaikaan. Kolmedimensionaalisessa jäähtymisessä jäähtymisaika $t_{8/5}$ saadaan laskettua kaavasta 2. /2/

$$t_{\frac{8}{5}} = (0,043 - 4,3 \times 10^{-5} \times T_0) \times \frac{\eta^2 E^2}{d^2} \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] F_2 \quad (2)$$

missä

$t_{8/5}$ = jäähtymisaika

T_0 = työlämpötila (°C)

η = termien hyötysuhde

E = hitsausenergia (kJ/cm)

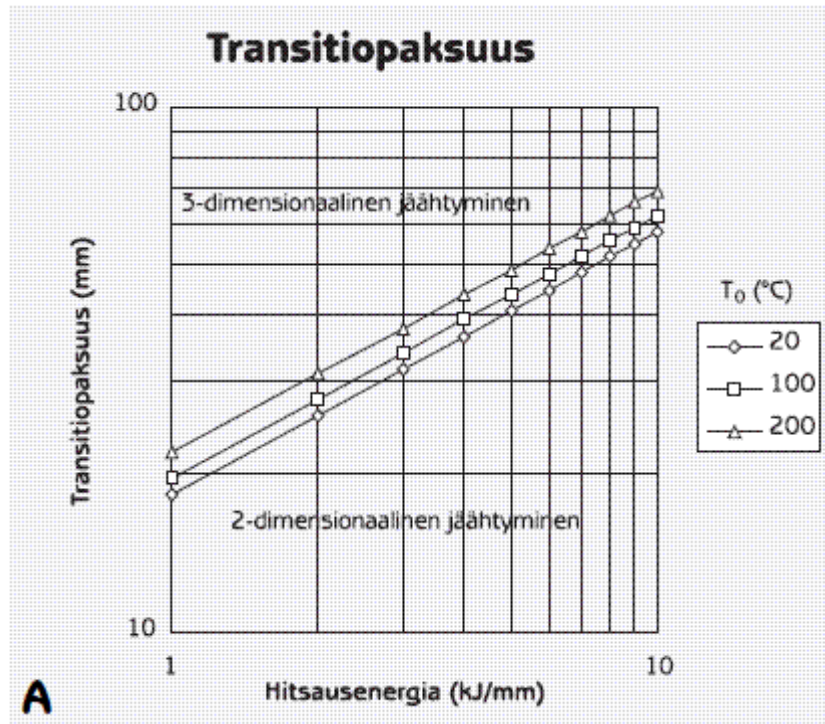
F_2 = hitsityyppikerroin

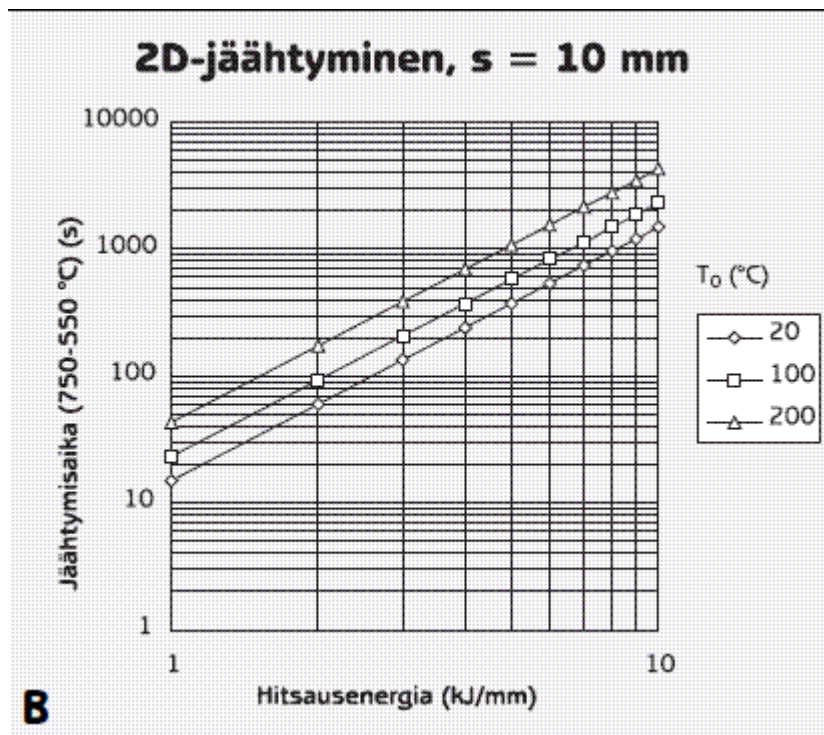
d = hitsattavan aineen paksuus

Se, onko kyseessä kaksidimensionaalinen tai kolmedimensionaalinen jäähtyminen, määritetään aineenpaksuuden perusteella kuvan 14 transitiopaksuusdiagrammia käyttäen. Oikeaan valintaan vaikuttaa myös käytetty työlämpötila. Diagrammin lukeminen tapahtuu siten, että jos sen antama transitiopaksuus on suurempi kuin hitsattavan materiaalin paksuus, niin kyseessä on kaksidimensionaalinen jäähtyminen. Muussa tapauksessa kyseessä on kolmedimensionaalinen jäähtyminen. Jäähtymisajat voidaan määrittää kuvien 15 ja 16 diagrammien avulla. 2- ja 3-dimensionaalisten kappaleiden liitosmuotokertoimet on esitetty taulukossa 17. /2/

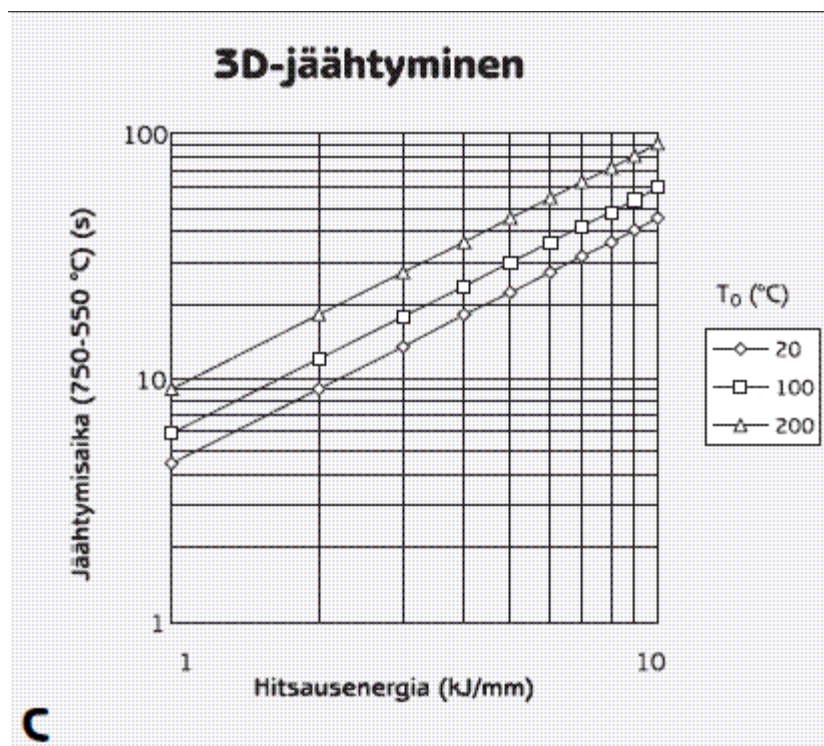
Taulukko 17. 2- ja 3-dimensionaalisten kappaleiden liitosmuotokertoimet /2/

Liitostyyppi	2-dimensionaalinen (F_2)	3-dimensionaalinen (F_3)
Päällehitsi	1	1
Välipalot päittäishitsauksessa	0,9	0,9
Yksipalkohitsi nurkkaliitoksessa	0,67...0,9	0,67
Yksipalkohitsi T-liitoksessa	0,45...0,67	0,67

**Kuva 14. Transitiopaksuus diagrammi /2/**



Kuva 15. Kaksidimensionaalinen jäähdyminen diagrammi /2/



Kuva 16. Kolmedimensionaalinen jäähdyminen diagrammi /2/

2.8.2. Hitsausenergia ja lämmöntuonti

Hitsauksen lämpösykli vaikuttaa liitoksen muutosvyöhykkeen mekaanisiin ominaisuuksiin vähiten, kun lämmöntuonti on pieni. Taulukossa 17 on esitetty päittäis- ja pienaliitoksille lämmöntuonnin arvoja, joilla hitsattaessa saavutetaan liitoksessa hyvät mekaaniset ominaisuudet. Muutosvyöhykkeen pehmeneminen korostuu käytettäessä suurta lämmöntuontia. Suhteellisen alhaisen seostuksen ja karkenevuuden ansiosta ultraluja teräs soveltuu hyvin hitsattavaksi menetelmillä, joilla lämmöntuonti on pieni ja jäähtymisaika $t_{8/5}$ lyhyt. /14/

Hitsin hidas jäähtyminen saadaan käyttämällä suurta lämmöntuontia, josta seuraa pitkä jäähtymisaika. Tämä kuitenkin heikentää mekaanisia ominaisuuksia, lujuutta ja sitkeyttä, joista iskusitkeys on herkempi tälle kuin lujuus. Hitsin nopea jäähtyminen saadaan käyttämällä pientä lämmöntuontia, josta seuraa lyhyt jäähtymisaika. Tämä saa aikaan karkenemista, jolloin kovuus nousee, mutta vetyhalkeilutaipumus kasvaa. /24/

Hitsausprosessissa käytetty hitsausenergia tuo hitsiin mukanaan lämpöenergiaa (Q). Tämän lämpöenergian määrä ei ole sama kuin käytetyn hitsausenergian määrä. Käytetystä hitsausenergiasta pitää vähentää säteilyyn, lämmönjohtumiseen, kaasukaarihitsauksessa kaasun lämmitykseen ja roiskeisiin menevä energian osuus. On tiedettävä termien hitsausenergia ja lämmöntuonti välinen ero. Käytännössä laskennassa ero on 20–40 %.

Sillä on erittäin suuri merkitys hitsin jäähtymisnopeuden, hitsin ominaisuuksien tai tarvittavan esikuumennuksen kannalta. Erityisesti on huomioitava että hitsausohjeeseen (WPS) tulee merkitä kaarienergian arvo ja hitsausprosessin tunnus.

Tässä projektissa Ruukki on ohjeistanut merkkamaan pWPS hitsausohjeeseen lämpöenergian sijaan käytetyn hitsausenergian (E). Hitsausenergialla, jota kutsutaan myös kaarienergiaksi, tarkoitetaan kaarihitsauksessa käytettyä energiaa hitsin pituusyksikköä kohti. Hitsausenergia (kaarienergia) (E) kJ/mm lasketaan seuraavasti:

$$E = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad (3)$$

missä,

U = kaarijännite (volttia)

I = hitsausvirta (ampeeri)

v = hitsausnopeus (mm/min) /21, s. 94./

Hitsausenergia on tärkeä suure hitsauksessa. Sillä on vaikutus moniin asioihin ja ominaisuuksiin hitsauksessa ja hitsiaineessa. Hitsausenergia ilmoitetaan yleensä myös hitsausohjeessa (WPS) oli kohde tai materiaali mikä tahansa.

Lämmöntuonnilla (Q) tarkoitetaan kaarihitsauksen yhteydessä hitsauksessa käytettyä energiaa, joka ilmoitetaan yleensä energiamääränä senttimetriä kohden (kJ/mm).

Lämmöntuonnilla on oleellinen vaikutus hitsin jäähtymisnopeuteen. Lämmöntuonti (Q) lasketaan seuraavasti:

$$Q = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} \cdot \eta \quad (4)$$

missä,

U = kaarijännite

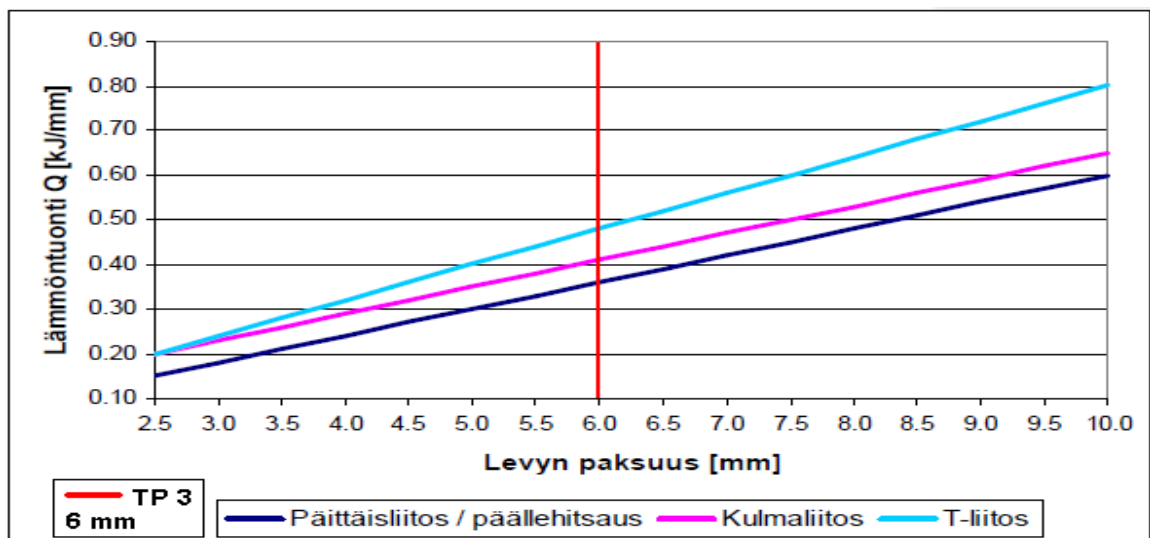
I = hitsausvirta

v = hitsausnopeus

η = hitsausmenetelmän hyötysuhde (MIG/MAG-hitsaus $\eta = 0,80$) /24, s. 94./

Kun tavoitteena on tasaluja liitos, tulee alilujan vyöhykkeen leveys olla mahdollisimman kapea suhteessa hitsattavan levyn paksuuteen. Hitsauksessa tulisi käyttää lämmöntuontia Q, jotta päästäisiin laskennallisessa jäähtymisajassa $t_{8/5}$ korkeintaan neljään sekuntiin. Esikuumennusta ei tulisi käyttää ja palkojen välinen lämpötila tulisi olla huoneenlämpötila. Ohutta nauhalevyä (2.5–10 mm) hitsatessa, hitsausliitoksen jäähtymistä voidaan tehostaa

kuparisella juurituella. Perinteisellä MAG-hitsauksella kuvan 18 maksimilämmöntuonnin alapuolelle on vaikea päästä, erityisesti paksuusalueilla 2.5...6 mm. Tämän takia tuleekin käyttää oikeaa hitsausprosessia esim. pulssi-MAG-hitsausta joka soveltuu hyvin lujien terästen hitsaukseen. Myös uusia hitsausprosesseja tulisi kehittää, että pystyttäisiin tuottavammin hitsaamaan Optim 960 QC tyyppisiä suorasammutettuja teräksiä. Kuvassa 18 on esitetty maksimilämmöntuontisuositukset päittäis-, -kulma ja T-liitokselle, suhteessa levyn paksuuteen välillä 2.5...10 mm. Kuvaan merkattu projektissa käytettävä paksuus 6 mm. /6/



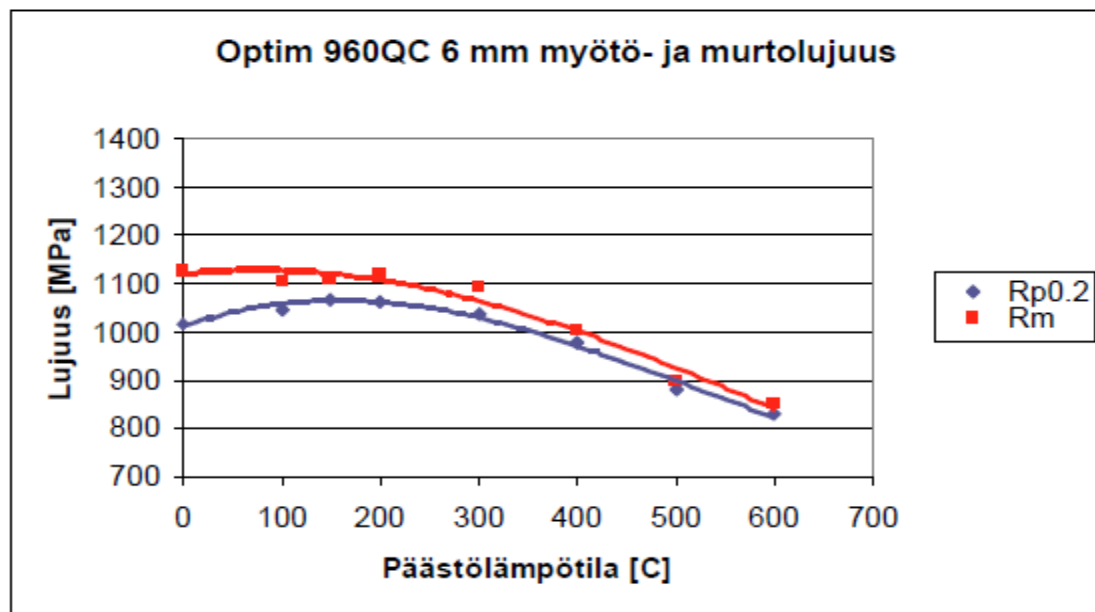
Kuva 18. Ruukin Optim 960 QC -teräksen maksimilämmöntuontisuositukset liitostyypeittäin, kun tavoitteena on tasaluja hitsiliitos. Hitsauksessa ei käytetä esikuumennusta. Palkojen välinen lämpötila tulee olla hitsattaessa huoneenlämpötila /6/

Lämmöntuonnin minimointi Optim 960 QC -teräkselle. Valitaan oikea hitsausprosessi, esimerkiksi MAG-pulssi, tandem-MAG, laser-MAG hybrid hitsaus tai laser hitsaus. Railotilavuuden pienentäminen, tarvitaan vähemmän sulaa täyttämään railo, saadaan liitos aikaan vähemmällä palkomäärällä. Hitsausnopeuden oikea valinta, esimerkiksi lisäämällä nopeutta saadaan aikaa pienempi lämmöntuonti ja luja liitos.

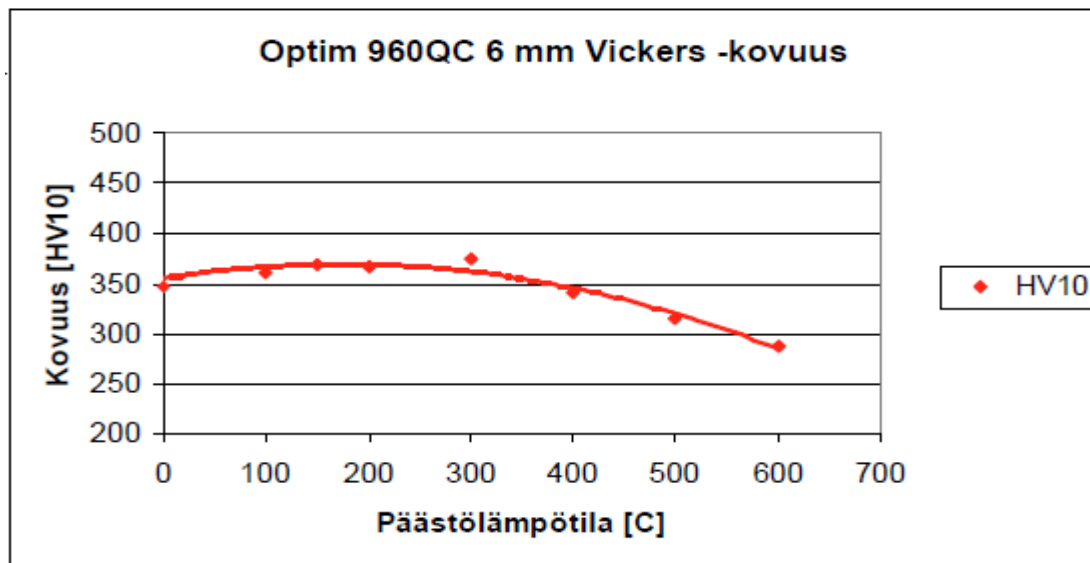
Työlämpötilan korottamistarve Optim 960 QC -teräksellä. Esikuumennus on yleinen työlämpötilan korottamistapa hitsauksessa. Työlämpötilan korottamistarve määräytyy pääasiassa teräksen ja hitsausaineiden kemiallisen koostumuksen eli karkenevuuden perusteella. Myös yhdistetty levypaksuus, hitsauksen lämmöntuonti ja hitsausaineiden hitsiin tuottama vetypitoisuus on otettava huomioon. Normaaleissa konepajaoloissa Optim 900 QC ja Optim 960 QC -teräksiä voi hitsata ilman esikuumennusta. Tämä on terästen lujuustasoonsa nähden alhaisten hiiliekvivalenttiarvojen taulukko 3 ja pienten levypaksuuksien ansiota. /14/

2.8.3. Lämpökäsittelyn vaikutus Optim 960 QC teräksen lujuuteen ja kovuuteen

Optim 900 QC ($R_{p0.2} \geq 900$ MPa) ja 960 QC ($R_{p0.2} \geq 960$ MPa) -terästen mikrorakenne, kovuus ja lujuus poikkeavat tavanomaisista rakenneteräksistä, joiden $R_e \leq 650$ MPa. Optim QC -teräksiä ei suositella lämpökäsiteltäväksi, sillä hehkutus korotetussa lämpötilassa heikentää terästen kovuutta ja lujuutta. Kuvassa 19 on esitetty Optim 960 QC -teräksen lujuuden muutos ja kuvassa 20 kovuuden muutos eri lämpötiloissa suoritettun päästöhehkutuksen jälkeen. Teräksen Charpy-V iskusitkeyteen (minimi $34\text{J}/\text{cm}^2/-40\text{ °C}$) lämpötilavälillä $0-600\text{ °C}$ tapahtuvalla hehkutuksella ei ole vaikutusta.



Kuva 19. Lämpökäsittely välillä 0-600 °C ja sen vaikutus myötö- ja murtolujuuteen, 6 mm Optim QC teräksellä



Kuva 20. Lämpökäsittely välillä 0 °C-600 °C ja sen vaikutus kovuuteen, 6 mm Optim QC teräksellä

Optim QC -terästen lämpökäsittelyä tulee välttää, koska lujuus ja kovuus heikkenevät. Kuvassa 19 nähdään kuinka jo noin 200 °C jälkeen sekä myötö- ja murtolujuus alkavat heikentymään mentäessä suurempiin lämpötiloihin. Kuvassa 20 nähdään kuinka lämpökäsittely vaikuttaa Optim 960 QC:n kovuuteen mentäessä yli 200 °C:een.

3. LIITOSTEN TARKASTUS JA MEKAANINEN AINEENKOETUS

Erilaisilla materiaalin aineenkoetusmenetelmillä tutkitaan materiaalien käyttäytymistä ja ominaisuuksia. Aineenkoetusmenetelmiä hyödynnetään mm uusien materiaalien T&K toiminnassa, valmistusmenetelmien kehittämisessä, laadun- ja kunnonvalvonnassa, materiaalivalinnassa sekä vauriotutkimuksessa. Aineenkoetusmenetelmät jaetaan kahteen ryhmään, ainetta rikkoviin menetelmiin ja ainetta rikkomattomiin menetelmiin. /21, s. 29./

Metallurgisissa tutkimuksissa halutaan selvittää, miten koostumus, muokkaus ja lämpökäsittely vaikuttavat metallien ominaisuuksiin. Metallin ominaisuudet ovat voimakkaasti riippuvaisia metallin rakenteesta. Näitä ominaisuuksia ovat muovattavuus, kovuus, lujuus, venymä, sähkön- ja lämmönjohtavuus sekä magneettiset ja kemialliset tekijät. Rakenteesta riippumattomia ominaisuuksia ovat mm. kimmoisuus ja lämpölaajeneminen. /21, s. 274./

3.1. Hitsien silmämääräinen tarkastus

Standardi SFS-EN 970 mukaan valmis hitsausliitos tarkastetaan käyttäen kahta eri tarkastusmenetelmää, ainetta rikkomaton (NDT) ja ainetta rikkova tarkastusmenetelmä. Projektissa suoritettiin hitsatuille koekappaleille sekä rikkomattomia että rikkovia aineenkoetuskokeita. /24/

Silmämääräinen tarkastus on aina tehtävä ennen muita Non Destructive Testing – menetelmiä tai näiden yhteydessä. Ihmissilmä kykenee havaitsemaan tutkittavan kappaleen taustasta värillisesti eroavan viivan, jonka leveys on melkein sama kuin hiuskarvalla (noin 50 µm). Tästä viivasta kapeammat epäjatkuvuuskohdat, tyypillisesti halkeamat, voidaan havaita vasta sen jälkeen kun niiden antamat näyttämät on saatu sivusuunnassa suurennetuiksi esimerkiksi magneettijauhe- tai tunkeuma nestetarkastuksella. Pyöreitä, tutkittavan materiaalin taustasta eroavia pisteitä ihmissilmä pystyy havaitsemaan, mikäli

niiden halkaisija ylittää noin 100 µm. Myös apuvälineitä voidaan käyttää suorittaessa silmämääräistä tarkistusta koemateriaalille. Esimerkiksi peilit helpottavat jossain tilanteissa tarkistamista. Hitsin pinnasta voidaan tunnistaa silmämääräisessä tarkistuksessa virheet, kuten liitoksen sovitusvirheet, hitsin pinnan muoto ja hitsin tasaisuus. Hitsikuvun korkeus, pienahitsin a-mitta tai z-mitta, läpihitsautuminen, reunahaava, halkeamat, huokoset, sytytysvirheet ja roiskeet. /24/

3.2. Hitsiliitosten magneettijauhetarkistus

Magneettijauhetarkistusta käytetään pintavirheiden, erityisesti halkeamien ja säröjen tarkastamiseen ferromagneettisesta materiaalista kuten hiiliteräksestä.

Magneettijauhe voi olla värillistä tai fluoresoivaa. Värillistä (yleensä mustaa) jauhetta käytettäessä kohteen pinta maalataan valkoiseksi kontrastivärillä. Fluoresoiva jauhe vaatii ultraviolettia valoa.

Kohde magnetisoidaan ikeen tai kelan avulla. Kelassa kulkeva sähkövirta magnetoi kohteen. Tarkastuksessa magneettijauhe ruiskutetaan kohteen päälle. Kohteessa olevat säröt tai halkeamat häiritsevät niitä kohtisuoraan vastaan kulkevan magneettikentän kulkua ja keräävät virheen muotoisen mutta leveyssuunnassa paljon suuremman näyttämän. /21, s. 43./



Kuva 21. Magneettijauhetaikastuksessa käytetty ikee ja hitsisaumassa näkyvä valkoinen kontrastiväri

Magneettijauhetaikastus on ainoa NDT-menetelmä, jolla pystytään havaitsemaan kapeat, tiukasti puristuneet halkeamat. Havaitun virheen leveyttä ei voida määrittää tarkasti, mutta havaitun virheen pituus pystytään määrittämään hyvin. /12/

3.3. Hitsausliitosten radiografinen kuvaus

Radiograafisella tarkastuksella eli röntgenkuvauksella tarkoitetaan menetelmää, jossa hitsisauma kuvataan röntgenputkella. Radiografia paljastaa hyvin kolmiulotteiset viat. Kuvauksen jälkeen saatu filmi kehitetään ja se tarkastetaan katselulaitteella.

Standardin SFS-EN 1435 mukainen radiograafinen kuvaus suoritettiin Raahessa Ruukin tehtaalla. Kuvauksesta on tehty tarkastuspöytäkirja joka on liitteenä 3.

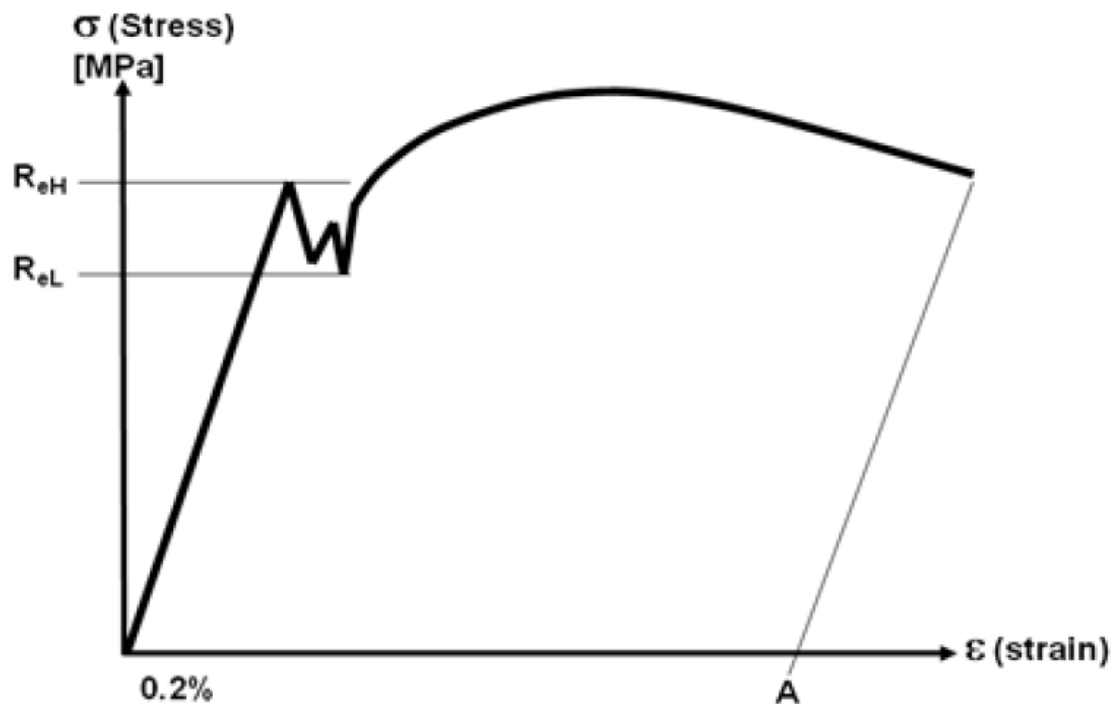
3.4. Vetokoe huoneenlämpötilassa

Vetokoe on yksi tärkeimmistä materiaalin testausmenetelmistä. EN 10002-1- standardin mukaisessa vetokokeessa saadaan selville materiaalin myötö- ja murtolujuus, venymät, kurouma sekä jännitykset. Vetokokeessa testattava sauva kiinnitetään molemmista päistään sauvan tyyppin mukaan joko kierre- tai lukkolehkeihin tai puristusleukoihin. /18/

Sauvaan kiinnitetään venymää mittaava anturi, ekstensometri. Vetokone kohdistaa sauvaan tasaisesti kasvavan aksiaalisen voiman, joka aiheuttaa sauvaan venymän. Tätä tietoa voidaan lukea tietokoneen näytöllä jännitysvenymäkäyränä.

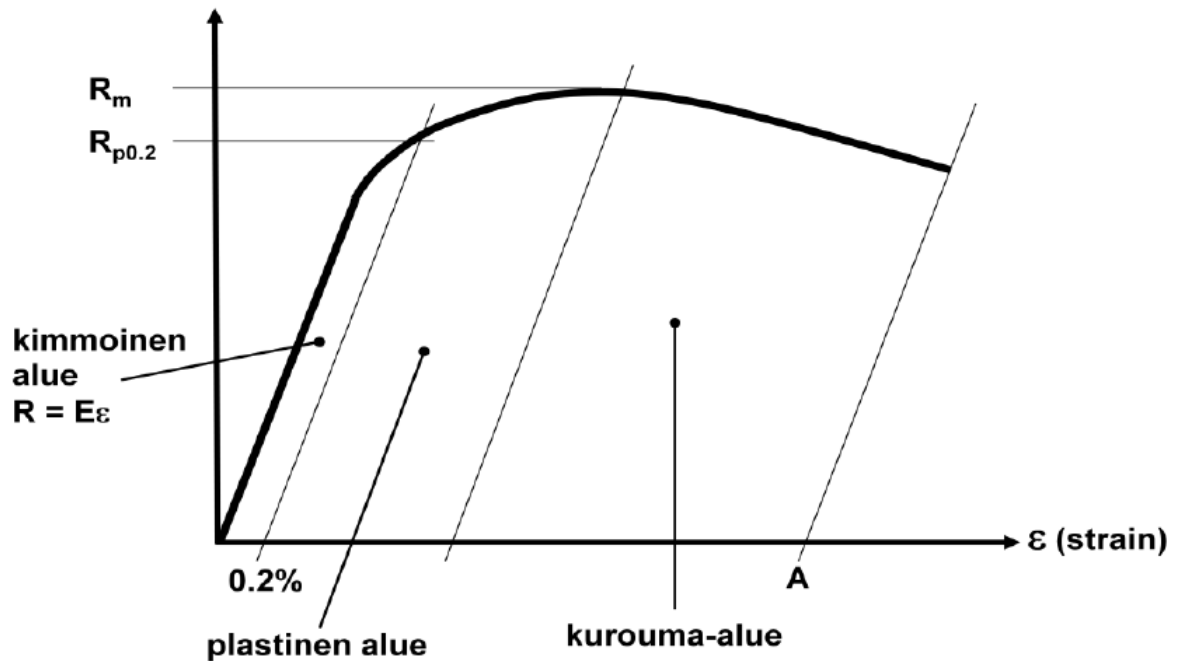
Jännitys on vedon alkuvaiheessa lähes täysin lineaarista ja suoraan verrannollista venymään, kunnes saavutetaan suhteellisuusraja. Materiaalin venymä on suhteellisuusrajaan saakka ja hieman sen yläpuolellakin kimmoista, eli palautuvaa. Seuraava saavutettava raja jännityksen kasvaessa on kimmoraja, jonka jälkeen venymä on plastista eli palautumatonta, vaikka kuormitus loppuisikin.

Jännityksen kasvaessa kimmorajan jälkeen materiaali myötää hetken. Tällöin jännitys ei kasva, mutta venymä kasvaa. Tältä alueelta rekisteröidään kaksi arvoa: ylempi ja alempi myötöraja (R_{eH} ja R_{eL}). Rasituksen yhä kasvaessa materiaali myötölujuus, jolloin jännitys alkaa kasvaa, mutta venymä pienenee, kunnes materiaali saavuttaa murtolujuutensa. Ilmiö on erittäin tärkeä käytännön kannalta ja on selitettävissä dislokaatioteorian avulla. Murtolujuus (R_m) on suurin jännityksen arvo vedon aikana. Ohitettuaan murtolujuutensa materiaalin venymä kasvaa voiman pienentyessä ja koesauvan kuroutuessa, kunnes materiaali saavuttaa murtumispisteensä.



Kuva 22. Jännitys-venymäkäyrä materiaaleille, joilla esiintyy terävä myötöraja /20/

Kuvassa 22 on esitetty tyypillinen jännitys-venymäkäyrä materiaalille, jossa esiintyy selkeä myötöraja. Kuvan 22 käyrä kuvaa hyvin seostamattomien teräksien käyttäytymistä vedon alaisena. Terävää jännityksen putoamista, joka esiintyy myötämisen aikana, kutsutaan teräväksi myötörajaksi. Ilmiö perustuu myötövanhenemiseen, joka on välisija-atomien ryhmittymistä dislokaatioiden jännityskenttiin. Tällöin dislokaatiot lukittuvat ja niiden liike vaikeutuu. Kun jännitys saavuttaa myötörajan, dislokaatiot lähtevät liikkeelle, ja kestää jonkin aikaa kunnes myötövanheneminen saa taas aikaan lujittumista (käyrän sahalaitainen osuus). /20/



Kuva 23. Jännitys-venymäkäyrä materiaaleille, joilla ei selkeää myötörajaa esiinny /20/

Kuvassa 23 on esitetty tyypillinen jännitys-venymä käyrä materiaalille, jolla ei esiinny selkeää myötörajaa. Kuvan mukaisella tavalla käyttäytyvälle materiaalille määritetään sen sijaan venymisraja, joka on pysyvää venymää vastaava koesauvassa vaikuttava jännitys. Yleisesti käytetään 0.2 % ja 1.0 % venymisrajoja eli $R_{p0.2}$ ja $R_{p1.0}$ - arvoja. Esimerkiksi austeniittiset ruostumattomat teräkset käyttäytyvät kuvan 23 mukaisesti. /20/

Liite 1. Zwick Allround-floor Z250kN vetokoneen tekniset tiedot

3.5. Taivutuskoe

Taivutuskokeen tarkoitus on selvittää hitsausliitosten lisäaineen ja perusaineen rajapintojen muodonmuutosten kesto sekä hitseissä olevien pienten materiaaliveirheiden ja mikrosäröjen taipumus nousta materiaalin pintaan asti ulottuviksi makroskooppisiksi säröiksi tai murtumiksi. Näin ollen makroskooppiset säröt ja murtumat voidaan havaita magneettijauhettutkimuksessa ja makrohie- ja mikrohietutkimuksessa. Hitsien taivutuskoe

perustuu standardiin SFS-EN 910. Sauvamaiseen koekappaleeseen aiheutetaan taivuttamalla pysyvä muodonmuutos. Taivutus voidaan tehdä sauvaan juuri-, pinta- tai sivutaivutuksena. Taivutuskoe suoritetaan käyttäen taivutintelaa tai rullainta.

Taivutuskokeen koeksuovat irrotetaan siten, ettei materiaali pääse kuumenemaan sahauksen tai hionnan aikana. Kuumeneminen saisi mahdollisesti aikaan muutoksia materiaalin mikrorakenteessa, näin ollen tehtävät taivutuskokeet eivät olisi luotettavia ja vertailukelpoisia. Koeksuovaa valmistettaessa vedon puolelle tuleva pinta ja sen sivupinnat hiotaan siten, ettei niissä ole poikittaisia naarmuja.

Kokeissa käytettävien sauvojen mitat määritetään testausstandardin ohjeiden mukaisesti huomioiden materiaalin ainevahvuuden määrittämät vaatimukset. Koeksuovat valmistetaan koneistamalla, yleensä sahaamalla. Taivutuskoesauvojen mitat eivät ole kovin kriittisiä, koska taivutuskokeessa ei synny mitään numeerisia tuloksia, vaan koe arvostellaan silmämääräisesti.

Kolmipistetaivutuksessa, joka on yleisin hitsien taivutustestausmenetelmä, asetetaan koeksuova kahden yhdensuuntaisen tukitelan päälle. Hitsauskokeen taivutuksissa poikittaisen hitsin on oltava telojen keskellä. Taivutintelaa painetaan hitaasti ja tasaisella kuormituksella koeksuovaan nähden kohtisuorasti tukitelojen keskeltä. Taivutuksen aikana tarkkaillaan koeksuovan vedon puoleista pintaa ja sivupintoja mahdollisten virheiden toteamiseksi. /20/

Taivutuskoesauvoihin tulleet murtumat todennettiin silmämääräisesti ja halkeamien tuli olla sellaisia että ne pystyttiin selkeästi havaitsemaan. Murtumien kohdat määritettiin myös paikan perusteella, hitsiaineessa, sularajalla tai HAZ:ssa.

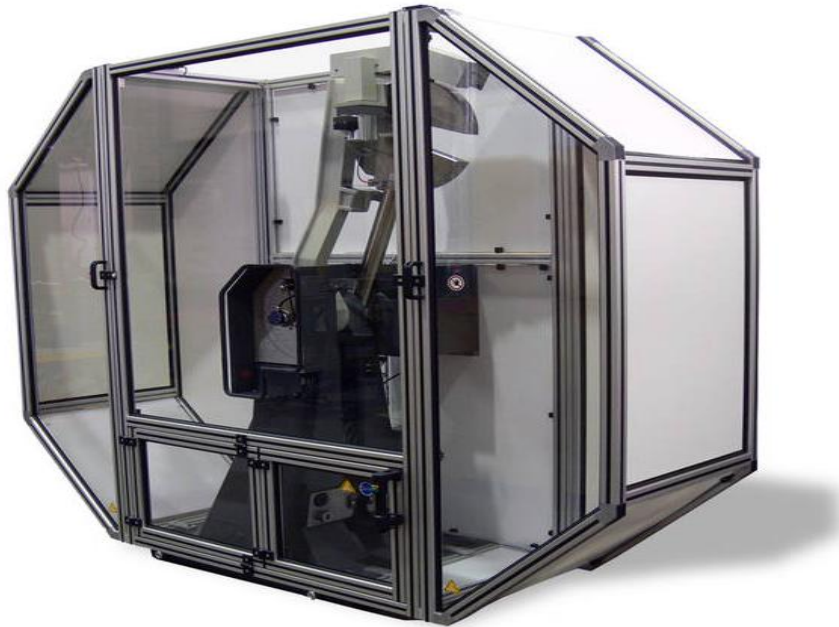
3.6. Iskukoe

Iskukokeen tarkoituksen on testata materiaalin käyttäytymistä nopean iskumaisen kuormituksen alaisena. Iskukokeella voidaan selvittää materiaalin mahdollinen hauraus eri lämpötiloissa. Materiaalin iskusitkeys kuvaa käyttäytymistä iskumaisen kuormituksen alaisena. Materiaaleissa haurautta esiintyy etenkin matalissa lämpötiloissa. Iskukokeet tehdään pääasiassa Charpy-iskukoe menetelmällä. Charpy-vasara on heilurivasara jossa on kiilamainen iskuheiluri, jonka massa on (m). Vasara iskee pudotessaan korkeudelta (H) koesauvaan ja katkaisee tai taivuttaa sen. Iskun jälkeen vasara jatkaa rataansa ylöspäin korkeudelle (h) energialla, joka siihen on jäänyt sen luovutettua energiaa iskutyöhön. Näitä suureita apuna käyttäen voidaan laskea iskutyö (W). Nousukorkeus vastakkaiselle puolelle voidaan lukea kiinnitysakselin mitta-asteikosta. Iskutyö voidaan laskea käyttäen kaavaa 5.

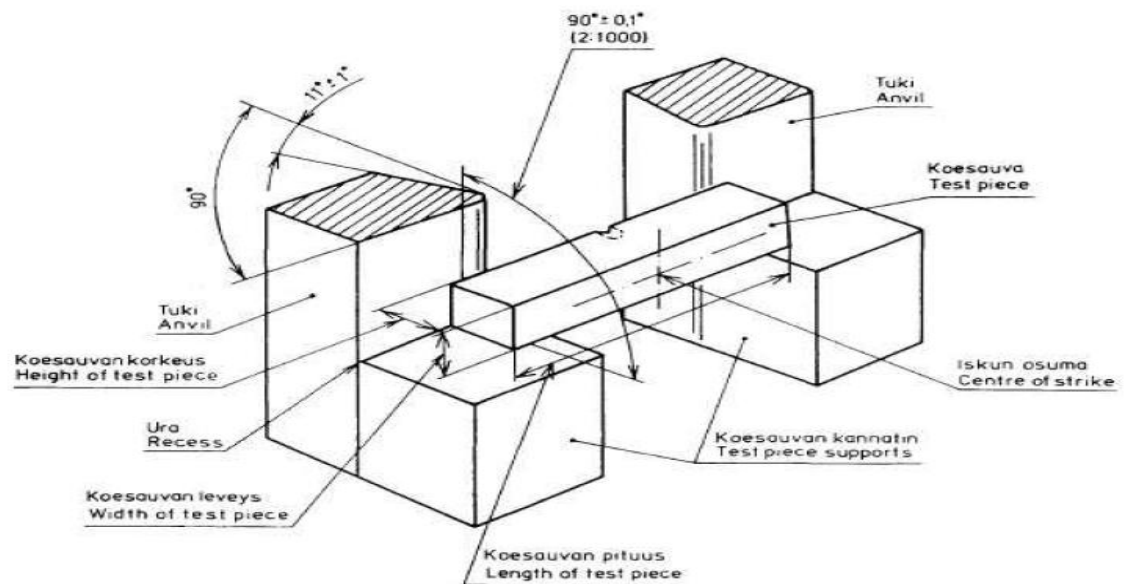
$$W = mg(H - h) \quad (5)$$

Yleensä asteikosta voi lukea myös iskuun kuluneen työn. Iskuvasaraan on mahdollista myös instrumentoida asentotunnistukseen tai optiseen tunnistukseen perustuva koneellinen tuloksen luku. Charpy-iskukokeet suoritetaan standardin SFS-EN 10045-1 mukaisesti useimmiten mitoiltaan 10 x 10 mm sauvoille, kuva 25. Iskukokeessa on mahdollista käyttää myös pienempiä sauvoja. Katkenneesta sauvasta voidaan tarvittaessa mitata sauvan poikittaislaajentuma eli lateraaliekspansio, joka kertoo kuinka paljon sauva on levinnyt kohtisuoraan iskua vastaan kuormituksen alaisena.

Hitsausliitosten iskukokeiden tarkoituksena on varmistaa, että valmistettu liitos käyttäytyy sitkeästi suunnitellussa lämpötilassa. Yleensä iskukoe suoritetaan käyttökohteen alimmassa suunnittelulämpötilassa, usein huoneenlämpötilan alapuolella. /20/



Kuva 24. Zwick Roell PSW 750 instrumentoitu iskuvasara /25/



Kuva 25. Koesauvan tuenta, standardin SFS-EN 10045-1 mukainen Charpy-iskusauva /17/

Hitsausliitosten iskukokeessa tutkitaan hitsiä sekä muutosvyöhykettä (HAZ). Iskukokeessa testataan yleisimmin 3 koesauvaa muutosvyöhykkeeltä (HAZ) ja 3 koesauvaa hitsistä. Sauvojen lovien paikkojen tunnuksina käytetään standardissa SFS-EN 875 esitettyjä merkintätapoja, esimerkiksi VWT 0/1, jotta sauvojen lovien paikat olisivat yksiselitteisesti määritellyt. /20/

Merkintä muodostuu seuraavasti:

V = Koesauvat tyyppi: Charpy V

W = Koesauvan lovi hitsissä (WELD)

T = Koesauvan lovi on kohtisuorassa pintaan nähden (Transverse)

0 = Loven paikka on keskellä hitsiä

1 = Koesauvan yläpinta on 1 mm päässä kappaleen pinnasta.

Liite 2. Zwick Roell PSW 750 instrumentoidun iskuvasaran tekniset tiedot.

3.7. Vickersin kovuuskoe

Kovuuskoe suoritetaan Standardin SFS-EN ISO 6507 mukaan, tässä menetelmässä pyramidin muotoista timanttikärkeä painetaan tietyllä voimalla mitattavaan pintaan ja mitataan syntyneen painuman halkaisijat, painona on 1–100 kg massa. Paino pidetään 10–15 sekunnin ajan. Saatu kovuusluku on kuormituksen ja painuman pinta-alan lukuarvojen suhde kokeessa käytetyn timanttipyramidin mukaisesti. Vickers- kovuudesta käytetään myös nimeä timanttipyramidikovuus (diamond pyramide hardness). /22/

Vickers-mittauksella voidaan luotettavasti määrittää esimerkiksi hitsaussauman ylimenokovuus. /20/

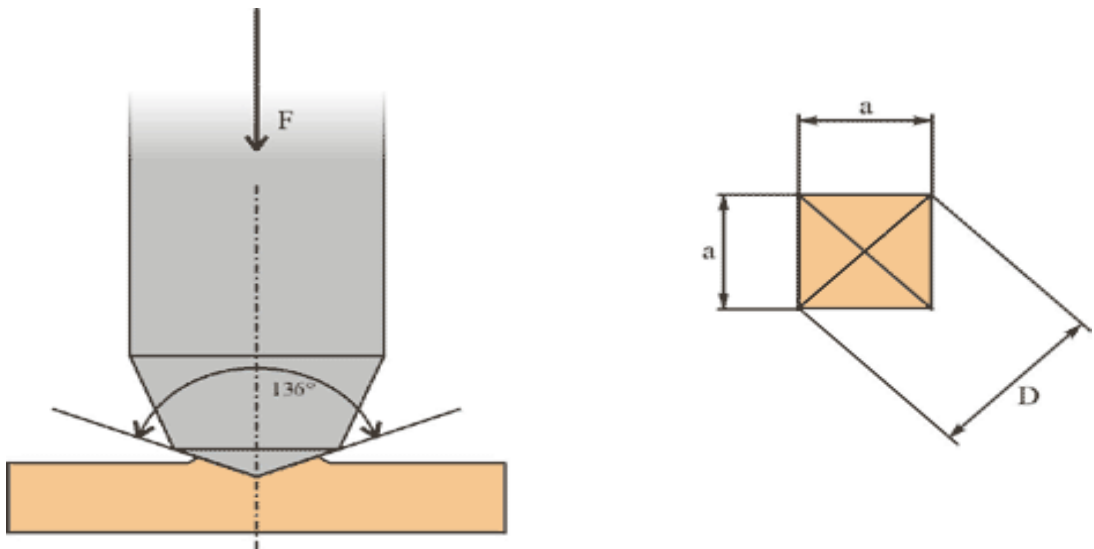
Ylimenokovuutta mitattaessa koekappaleesta tehtyyn poikkileikkaushieeseen painetaan Vickers-mittalaitteella jälkiä suorassa linjassa yli hitsaussauman. Mittauspisteet alkavat toiselta puolelta perusaineesta jatkuen muutosvyöhykkeen, sularajan ja hitsiaineen yli

toiselle puolelle perusaineeseen. Ylimenokovuudesta saadaan graafinen käyrä, josta selviävät mahdolliset hitsauksen aiheuttamat kovuuden muutokset. /20/

Vickers-mittauksessa tulos luetaan tietokoneeseen kytketyn mikroskoopin avulla. Vickers-mittauksessa painimena on suora neliöpohjainen timanttipyramidi, jonka vastakkaisten tahkojen välinen kulma on 136 astetta. Mittausohjelmassa osoitetaan painimen jäljen nurkkapisteet, joiden perusteella ohjelma laskee HV-kovuuden. Kovuuteen vaikuttavina tekijöinä ja muuttujina on myös huomioitava käyttävä HV-asteikko ja suurennos. HV-kokeita tehdään yleisimmin HV10, HV5 ja HV1-asteikoilla, joissa numeroarvo kertoo kärjen kuormituksen kilogrammoina. Tuloksena saadaan haluttu kovuusjakauma tai yksittäisiä kovuuspisteitä. /20/

HV-kovuus voidaan laskea käyttämällä kaavaa 6.

$$HV = \frac{2 \times \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \quad (6)$$



Kuva 26. Timanttipyramidi ja kovuusmittausjälki Vickers-kovuusmittausmenetelmässä /22/

Kärkikulma on valittu 136° :ksi, jotta mittausjälki olisi geometrisesti Brinellin koetta vastaava, kuva 26. Näin ollen Brinell- kovuudet ja Vickers- kovuudet ovat teoreettisesti samalla kovuusasteikolla.



Kuva 27. Kuvassa 20-kertainen suurennos kovuusmittausjäljestä messinkikappaleen pinnalla ja mitta-asteikko /22/

Kovuusmittausarvo voidaan laskea mittausjäljen diagonaalien pituudesta ja käytetystä voimasta seuraavasti: missä F on voima ja d on diagonaalien pituuksien keskiarvo. Käytettävä voima riippuu mitattavasta metallista.

Vickers- kovuudet soveltuvat sekä pehmeille että kovalle aineille. Tulos on riippumaton kuormitusvoimasta, kunhan käytetty kuormitusvoima on yli 30N. Painumajälki on geometrisesti sama riippumatta painuman koosta. Kovuusmittaus voidaan suorittaa myös ohuille kappaleille. Myös alle kilon painojen käyttö on mahdollista. Kun käytetään hyvin pieniä painoja, voidaan mitata niin sanottuja mikrokovuuksia. /22/

3.8. Näytteen valmistus

Eri lisäaineella hitsatuista liitoksista valmistetaan näytteet mekaanisten ominaisuuksien testaamista varten standardin SFS-EN 15614-1 mukaan.

Hyväksyttävän tuloksen saamiseksi on tärkeä, että näyte irrotetaan huolellisesti tutkittavasta kappaleesta. Perusaineen kovuus ratkaisee, miten näyte kannattaa irrottaa. Näytteen tulee olla riittävän iso, jotta sen käsittely onnistuu ilman erikoisvalmisteluja. Kuvassa 28 on esitetty koesauvojen irrotuskohdat päittäishitsatusta koekappaleesta.

Pehmeästä materiaalista näyte voidaan irrottaa sahaamalla. Itse sahauspinta on usein kelpaamaton tutkittavaksi, koska kylmätyöstö on voinut vaikuttaa siihen.

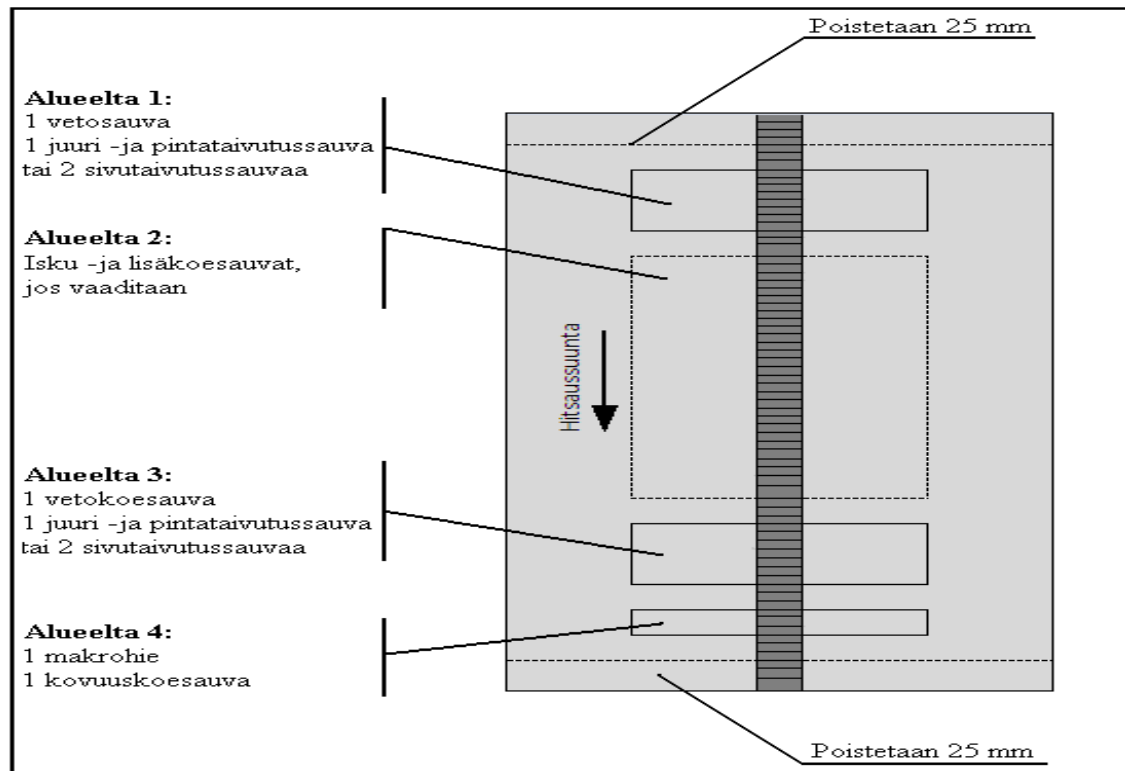
Kovat materiaalit on usein polttoleikattava. Irrotuksen yhteydessä on huolehdittava, että näytteen jäähditys on tehokas, että lämpötila ei nouse liikaa eikä vaikuta materiaalin mikrorakenteeseen. Muuten materiaalin pinnan mikrorakenne voi muuttua ja metalliopilliset tutkimukset tuottavat vääriä johtopäätöksiä. /21, s. 274./

Näyte on hiottava niin, että tutkittava pinta saadaan peilikirkkaaksi. Hionta tehdään vesihiomapaperilaikoilla karkeasta laikasta asteittain siirtymällä hienompaan. Jäähditys – ja voiteluaineena käytetään vettä. Jäähditys on tärkeä, jotta näytteen pinta ei kuumene.

Hionta voidaan aloittaa hiomapaperilla, jonka karkeus on esim. 100 mesh’iä. Seuraavien hiomapaperien karheudet ovat 180, 220, 320, 500 ja tarvittaessa jopa 1200. Hiomapaperin karheusmitataan mesh’eissä, joka kertoo rakeiden lukumäärän pinta-ala yksikköä kohti. Lopuksi tutkittava pinta kiilloitetaan huopalaikoilla, käyttämällä alumiinioksidiemulsiota, timanttihainaa tai timantisuihketta voitelu- ja jäähditysaineena. Näytteeseen ei saa jäädä hiontanaarmuja, koska ne haittaavat ja jopa estävät varsinaisen tutkimuksen. Jos näytteessä on naarmuja, on se hiottava uudelleen. /21, s. 275./

Mikro- ja makrorakenteiden esiin saamiseksi on kiilloitettu näytteen pinta syövytettävä kullekin metallille sopivalla syövyttimellä. Syövytys voidaan tehdä myös elektrolyytisesti (ruostumattomat materiaalit). Syövytys tehdään siten, että näytteen pinta upotetaan syövytteeseen ja pidetään sitä muutamista sekunneista minuutteihin. Tutkittava materiaali ja syövytysaine määräävät pitoajan. Syövyte vaikuttaa mikrorakenteisiin eri tavalla, koska rakenteet liukenevat hieman tai eivät lainkaan. Tämän jälkeen näyte on huuhdeltava

vedessä ja alkoholissa, jotta syöpyminen loppuu. Lopuksi näyte kuivataan lämminilmapuhaltimella. /21, s. 275./



Kuva 28. Koesauvojen irrotuskohtien sijainti levyn päittäishitsatussa koekappaleessa
/12/

3.9. Makrohietutkimus

Makroskooppisessa tutkimuksessa tutkitaan metallin murtopintaa, hiottua ja syövytettyä pintaa tai metallinäytettä paljain silmin tai pienen < 50 kertaisen suurennoksen avulla (suurennuslasi, makroskooppi). Tutkimuksessa voidaan havaita huokoset, imukotelot, hitsausvirheet, suuret epäpuhtausulkeumat, lämpökäsittelyn tasaisuus, valukappaleen ja hitsin jähmettymisrakenteet, lämpövyöhykkeet ja käytetty valmistusmenetelmä. /21, s. 275–276./

3.10. Mikrohietutkimus

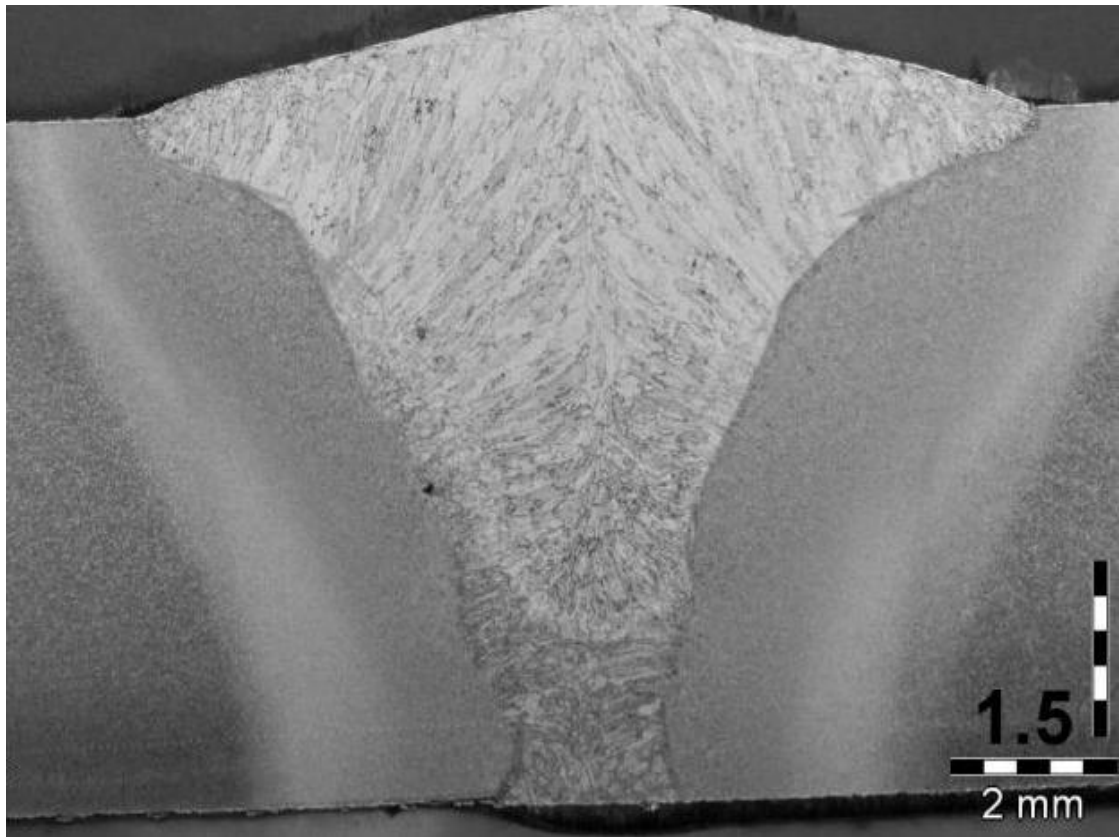
Mikroskooppisessa tutkimuksessa tutkitaan metallin rakenteen yksityiskohtia erilaisten mikroskooppien avulla. Tavallinen laite on optinen valomikroskooppi, jonka suurennuskyky on korkeintaan 2000-kertainen ja erotuskyky 400–500 nm. Valomikroskoopilla voidaan tutkia tarkemmin metallista löydettyjä hitsausvirheitä, kuten mm. halkeamia, imukoteloita, huokosia, lämpökäsittelyn tasaisuutta, lämpövyöhykkeitä. /21, s. 276./

Mikrorakennetarkastelua varten käytössä on myös FE-SEM elektronimikroskooppi ja EDS röntgenanalysaattori. EDS on spektrometri, joka käyttää hyväkseen SEM-kuvauksessa irtoavien elektronien röntgensäteilyä, joten EDS on aina yhdistettynä FE-SEM laitteeseen. /8/

FE-SEM lyhenne tulee englannin kielen sanoista Field Emission-Scanning Electron Microscope eli kenttäemissio-pyyhkäisyelektronimikroskooppi. /8/

Elektronimikroskooppi on mikroskooppi, jossa käytetään näkyvän valon sijaan elektronisuihkua. Tarpeeksi isoihin suurennoksiin mentäessä valon aallonpituus ei riitä ja valo korvataan elektroneilla. Valomikroskoopeilla maksimisuurennokset ovat 1000–2000-kertaisia, mutta elektronimikroskoopeilla päästään jopa yli 200 000-kertaisiin suurennoksiin. Saaduissa suurennoksissa on korkea resoluutio joka tarkoittaa hyvää erottelukykä kuvasta. /8/

EDS lyhenne tulee englannin kielen sanoista Energy Dispersive Spectrometry eli röntgenanalysaattori tai alkuaineanalysaattori. EDS:llä voidaan nopeasti analysoida halutun pinnan alkuainejakauma ja EDS:iin kuuluvalla ohjelmistolla voidaan muodostaa ja käsitellä tutkituista materiaaleista erilaisia visuaalisia käyriä, kuvia ja karttoja. /8/



Kuva 29. Esimerkki päittäisliitoksen makrokuvasta /24/

4. KOKEIDEN SUORITUS

Hitsaukset suoritettiin Tornion JaloteräsStudiolla työssä tutkittujen lankojen osalta. Hitsauksissa käytettiin yhtä hitsausenergia (kaarienergia) arvoa $E=0,57\text{kJ/mm}$.

Projektin hitsaukset muuttuivat palkojen osalta siten, että suunniteltu juurihitsi tehtiin myös pulssi-MAG hitsauksena, näin ollen sekä juuri- ja pintapalko hitsattiin käyttäen pulssi-MAG hitsausta. Kokeissa hitsatut levyt olivat kooltaan 200 mm x 500 mm sekä paksuudeltaan 6 mm. Langoista ainoastaan täytelanka Coreweld 89 osoitti voimakkaampaa roiskimista hitsattaessa kuin muut langat, tämän takia Coreweld 89 hitsaukset suoritettiin pienemmillä arvoilla kuin muilla projektiin valituilla langoilla. Muita mainittavia eroavaisuuksia langoilla hitsauksissa ei ollut. Kaikista viidestä koehitsistä tehtiin hitsausarvojen pWPS-seurantapöytäkirjat, joista löytyy käytetyt arvot ja parametrit. Pöytäkirjat liitteissä 4 (5/5).

Kaikki hitsatut koehitsit onnistuivat hyvin. Hitsisaumojen radiografisessa tarkastuksessa Coreweld 89 täytelangalla hitsatuista saumoista ei löydetty huokosia ollenkaan. Union X96 ja Aristorod 89 umpilangoilla hitsattiin kaksi levyä, joissa molemmilla oli toinen hitsi ilman huokosia. Melkein kaikki hitsit olivat B-luokassa ja C-luokan huokosia löydettiin vain muutama.

Ruukilla tehdyissä tutkimuksissa huomattiin, että osassa hitsisaumoissa oli jälkeä juuritukeen osumisesta, jonka seurauksena hitsatunliitoksen jäähtyminen on ollut nopeampaa kuin on ollut tarkoitus. Koehitsauksissa käytetyssä Haloy PSK-32 pituussaumakiinnittimessä on vakiovarusteena 2 kappaletta kuparista juuritukia. Jotta hitsi ei pääsisi kupariin asti, oli hitsattavien levyjen alle laitettu molemminpuolin 2 mm rst-levy.



Kuva 30. Kuparinen juurituki ja 2 kpl rst-levyjä joilla estettiin hitsin pääsy kupariin



Kuva 31. Projektissa käytetty Tornion JaloteräsStudios hitsauskuljetin. Kuljettimen ohjausjärjestelmä Kemecweld KCU 101 ja pituussaumakiinnitin Haloy PSK-32

4.1. Hitsien silmämääräinen tarkistus ja magneettijauhetarkistus

Kaikille hitsatuille saumoille tehtiin silmämääräinen tarkistus ja magneettijauhetarkistus. Tarkastetut viisi hitsisaumaa todettiin hyväksi, eikä raportoitavaa löytynyt. Hitsisaumojen tarkistuksen suoritti Tornion JaloteräsStudiolla projektissa hitsaajana toiminut erikoisammattimies Antti Vimpari.

4.2. Radiografinen kuvaus

Hitsit tarkistettiin röntgenkuvauksella ja niistä löydettyjä virheitä tutkittiin standardin SFS-EN ISO 5817 mukaan. Hitsisaumoista löydetyt huokokset huomioidaan koeksuvojen irrotuksessa, eivätkä näin ollen vaikuta tuloksiin projektin tuloksiin.

Terästen hitsiluokista on julkaistu eurooppalainen standardi SFS-EN 25817. Standardissa hitsit on jaettu sallittavien hitsausvirheiden ja niiden koon perusteella kolmeen eri hitsiluokkaan, D: tyydyttävä, C: hyvä, B: vaativa.

Taulukko 18. Ote röntgenpöytäkirjasta jossa näkyy kolme eri virhetyyppiä (B 2011, C 2011, B 504).

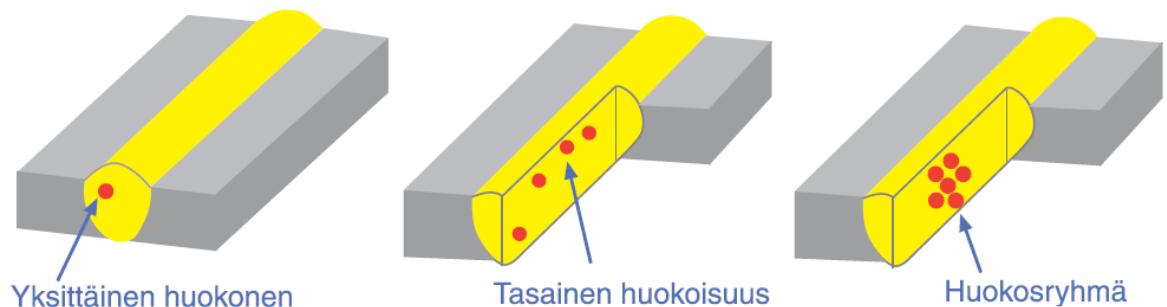
Kuvan tunnus Film ID	Nro No.	Ulkohalk. O.D. [mm]	Seinäämä Wall [mm]	Jännite Voltage [kV]	Valotus Exposure [min]	SFD [mm]	Kuv. Tekn. Exam. Tech.	Ind. Sij. IQI loc.	Ind.lanka IQI wire	Mustuma Density min/max	Virhetyyppi Imperfection type
A1: OK Autrod 12.51			6.0	185	30s	750	1	S	16	2,4-3,4	B 2011
A2: OK Autrod 12.51			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	C 2011
B1: Union X96			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B
B2: Union X96			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011
C1: Aristorod 89			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B
C2: Aristorod 89			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	C 2011
D1: Böhler X90 IG			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011
D2: Böhler X90 IG			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011
E1: Coreweld 89			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 504
E2: Coreweld 89			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 504

Virheet tarkoittavat seuraavaa:

B 2011, Hitsiluokka on B, hitsissä yksittäisiä huokosia, jotka B luokka sallii.

C 2011, Hitsiluokka C, hitsissä on yksittäisiä huokosia, jotka C luokka sallii.

Virheet B 2011 ja C 2011 kuuluvat ryhmään 2, ontelot. Onteloihin kuuluvat kaasuontelot (Nro 201), joita usein kutsutaan myös huokosiksi. Ne ovat hitsiaineeseen sulkeumiksi jääneiden kaasujen muodostumia ja täyttämiä, pallomaisia onteloita hitsiaineessa. Huokokset voivat esiintyä hitsissä yksittäisinä, jonossa, ryhmissä tai tasaisena huokoisuutena. 2011 tarkoittaa yksittäistä huokosta, joka on oleellisesti pallomainen. /5/



Kuva 32. Huokosten esiintymismuodot hitsausaumassa. /5/

Huokosten syntymiseen hitsissä on useita eri syitä, kuten esimerkiksi:

- Hitsiin jäänyt kaasu, joka voi olla peräisin kosteudesta, ruosteesta, rasvasta tai muista epäpuhtauksista lisäaineessa ja perusaineessa.
- Kosteaa lisäaine.
- Liian suuri maalikalvon paksuus hitsattavilla pinnoilla.
- Huono kaasusuojaus kaasukaarihitsauksessa: vetoisuus, liian pieni kaasunvirtaus, liian suuri kaasunvirtaus, roiskeita kaasusuuttimessa yms.
- Vuoto kaasunvirtausjärjestelmässä kaasukaarihitsauksessa, minkä tuloksena suojakaasun tulee vettä tai ilmaa.
- Liian pieni hitsausvirta.
- Liian pitkä valokaari.
- Liian hitsin nopea jäähtyminen.

- Liian suuri hitsausnopeus.
- Madonreikähuokoset rutiiliasentolangoilla: kosteus ja epäpuhtaudet langassa, liian suuri hitsausvirta ja liian lyhyt vapaalanka. /5/

B 504, Hitsiluokka B, hitsissä korkea juurikupu, jonka B luokka kuitenkin sallii.

Virhe B 504 kuuluu ryhmään 5, muoto- ja mittavirheet. Tällä ryhmällä tarkoitetaan hitsin ulkopinnan virheellistä muotoa tai liitoksen muuten epätäydellistä geometriaa. Virheellä (Nro 504) tarkoitetaan liian suurta juuren kuvun korkeutta eli pohjapalko ulkonee juuren puolelle liian paljon perusaineen tasosta. /5/



Kuva 33. Korkea juurikupu. /5/

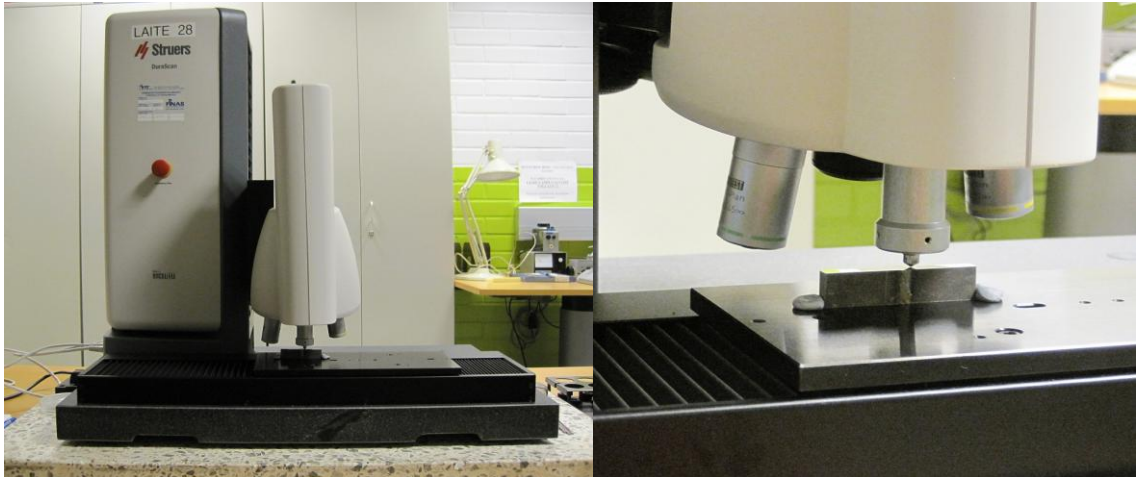
Syitä liian korkean juurikuvun syntymiseen voivat olla esimerkiksi:

- Liian suuri ilmarako.
- Liian matala juuripinta.
- Liian suuri hitsausenergia.
- Liian pieni kuljetusnopeus. /5/

4.3. Kovuusmittauksien suorittaminen

Kovuusmittaukset suoritettiin Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Raahessa. Kuvassa 35 vasemmalla Ruukin käyttämä kovuusmittauslaite, kovuusmittaukset tehtiin Vickersin menetelmällä. Vasemmassa kuvassa nähdään tarkemmin Vickers-mittauksen

painin, suora neliöpohjainen timanttipyramidi, joka jättää tutkittavaan materiaaliin salmiakin mallisen painauman.



Kuva 35. Struers kovuusmittauslaite

4.4. Vetokokeiden suorittaminen

Vetokokeet suoritettiin myös Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Kokeet olisi voitu toteuttaa myös Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun laboratoriossa, mutta projektin aikataulullisista syistä suurin osa testeistä suoritettiin Ruukin tehtailla.

Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun vetokoetuloksiin olisi ollut mahdollista liittää mukaan kokeen kuvaaminen ja oikea-aikainen toisto myöhemmin simulaatiossa ja tulosten tulkinnassa, mutta tässä projektissa se jätettiin pois. Kuvassa 33 Ruukin lopputyössä käyttämä vetokone.



Kuva 36. Vetokone

4.5. Iskukokeiden suorittaminen

Iskukokeet suoritettiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa. Iskukoesauvat jäähdytettiin standardin mukaisesti $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen, jonka jälkeen iskut suoritettiin 300J Charpy-V vasaralla. Kuvassa 24 on kokeessa käytetty iskukone.

4.6. Taivutuskokeiden suorittaminen

Taivutuskokeet suoritettiin Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Raahessa. Kaikille hitsisaumoille tehtiin kaksi pinta- ja juuritaivutusta. Koesauvoja painettiin taivutustuurnalla, jonka halkaisija oli 80 mm, lopullinen taivutuskulma kokeissa oli 180° .



Kuva 37. Taivutuskoe.

5. TULOKSET

Tässä osiossa käydään läpi lopputyössä suoritettujen testien tulokset. Tuloksissa on esitetty lisäainelankojen koostumukset, rikkovan ja ei rikkovan aineenkoetuksen tulokset ja mikrorakenne tarkastelut.

5.1. Lisäainelankojen koostumukset analyysipaloista

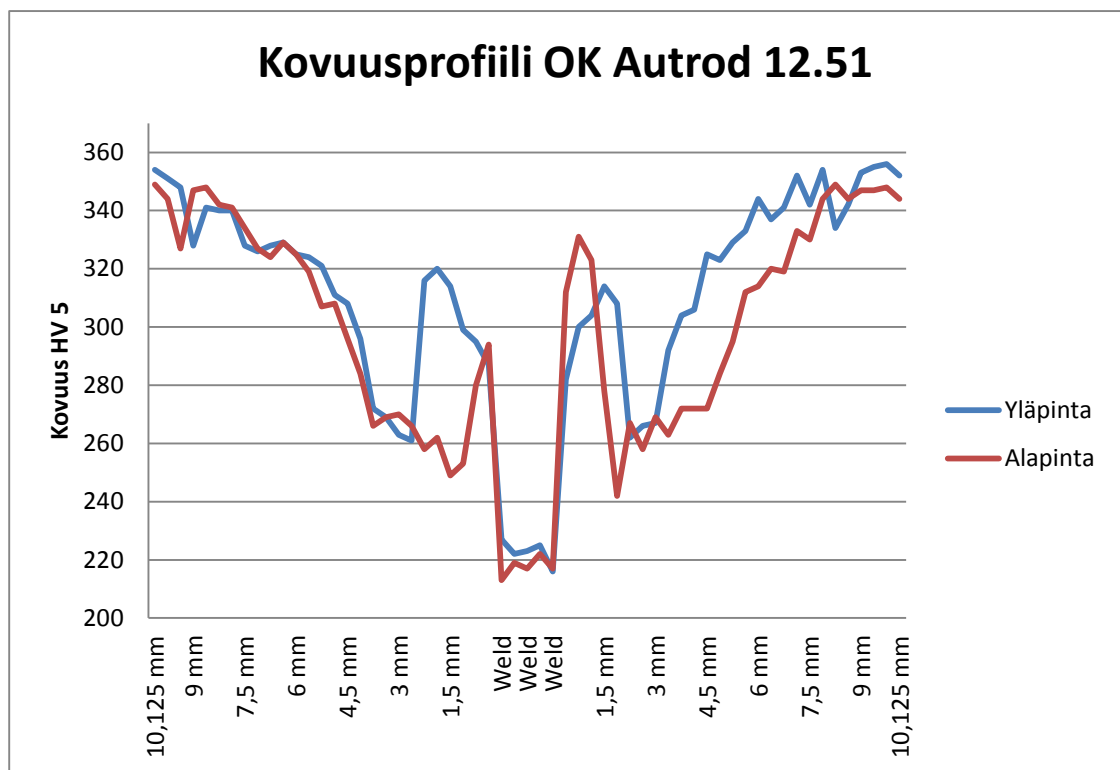
Kaikilla langoilla hitsattiin hitsauksien yhteydessä analyysipalat, joista voitiin määrittää lankojen sisältämä tarkka koostumus. Lankojen sisältämät erittäin pienet pitoisuudet ovat analyysipalassa olevia epäpuhtauksia, eikä niillä oleteta olevan merkittävää vaikutusta hitsiliitosten ominaisuuksiin. Analyysipalojen alkuaineet selvitettiin Ruukin laboratoriossa Raahessa.

Taulukko 19. Lisäainelankojen koostumukset

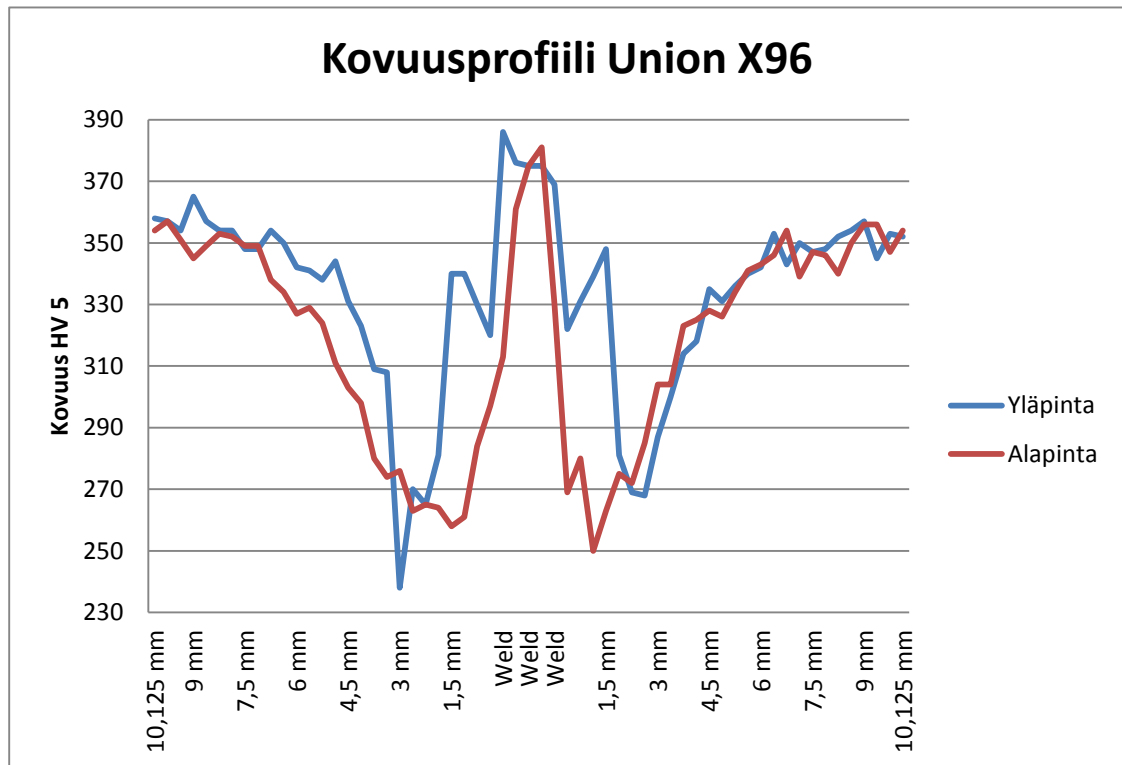
Lanka	CEV	CET		N (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	V (%)	Cu (%)	Al (%)	Ti (%)	Zr (%)
Union X96	0,69	0,39	Ohje max	-	0,12	0,8	1,9	0,45	2,35	0,55	-	-	-	-	-
			Mitattu	0,0075	0,104	0,603	1,55	0,392	2,27	0,484	0,005	0,075	0,002	0,018	0,004
Esab OK AristoRod 89	0,67	0,36	Ohje max	-	min 0,08 max 0,12	0,6 0,9	1,6 2,1	0,25 0,45	2,1 2,3	0,45 0,65	0,03	0,15	0,03	0,15	0,03
			Mitattu	0,008	0,077	0,677	1,51	0,41	2,17	0,556	0,008	0,036	0,007	0,018	0,006
Böhler X 90-IG	0,65	0,35	Ohje max	-	0,1	0,8	1,8	0,35	2,25	0,6	-	-	-	-	-
			Mitattu	0,0066	0,077	0,608	1,5	0,351	2,23	0,546	0,004	0,065	0,002	0,015	0,004
Esab Coreweld 89	0,72	0,38	Ohje max	-	0,1	0,8	1,3	0,6	2,5	0,7	-	-	-	-	-
			Mitattu	0,0052	0,079	0,533	1,33	0,53	2,59	0,708	0,004	0,033	0,005	0,003	0,004
Esab OK Autrod 12.51	0,27	0,19	Ohje max	-	0,1	0,9	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
			Mitattu	0,0081	0,075	0,54	1,04	0,03	0,036	0,008	0,002	0,103	0,002	0,001	0,001

5.2. Hitsiliitosten kovuusmittaukset

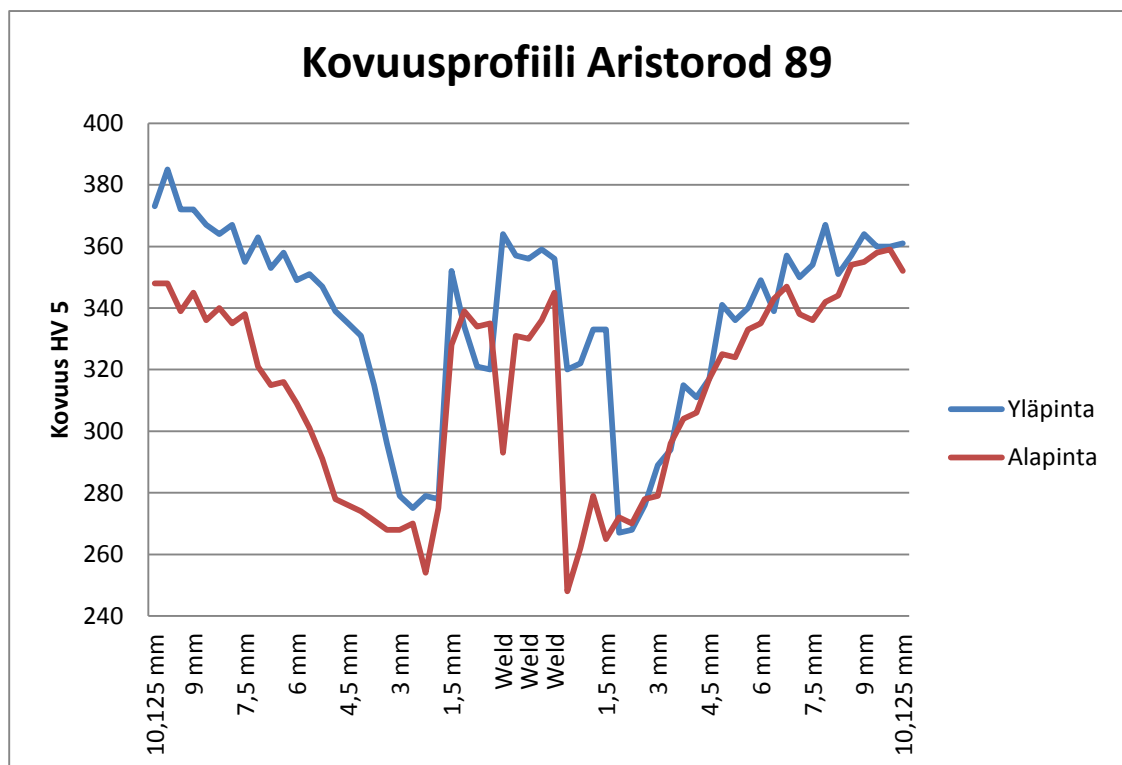
Hitsausseamien kovuusmittaukset tehtiin Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Raahessa. Mittaukset tehtiin mikrokovuusmittarilla paininvoimalla HV5 mittapisteiden etäisyys 0,375 mm. Mittaus tehtiin 1,5 mm etäisyydeltä perusaineen ylä- ja alapinnasta. Hitsiaineesta tehtiin viisi mittausta ylä- ja alapinta sekä hitsiaineen keskilinjasta. Mittaustuloksista tehdyt kovuusprofiilit on esitetty kuvissa 31–35.



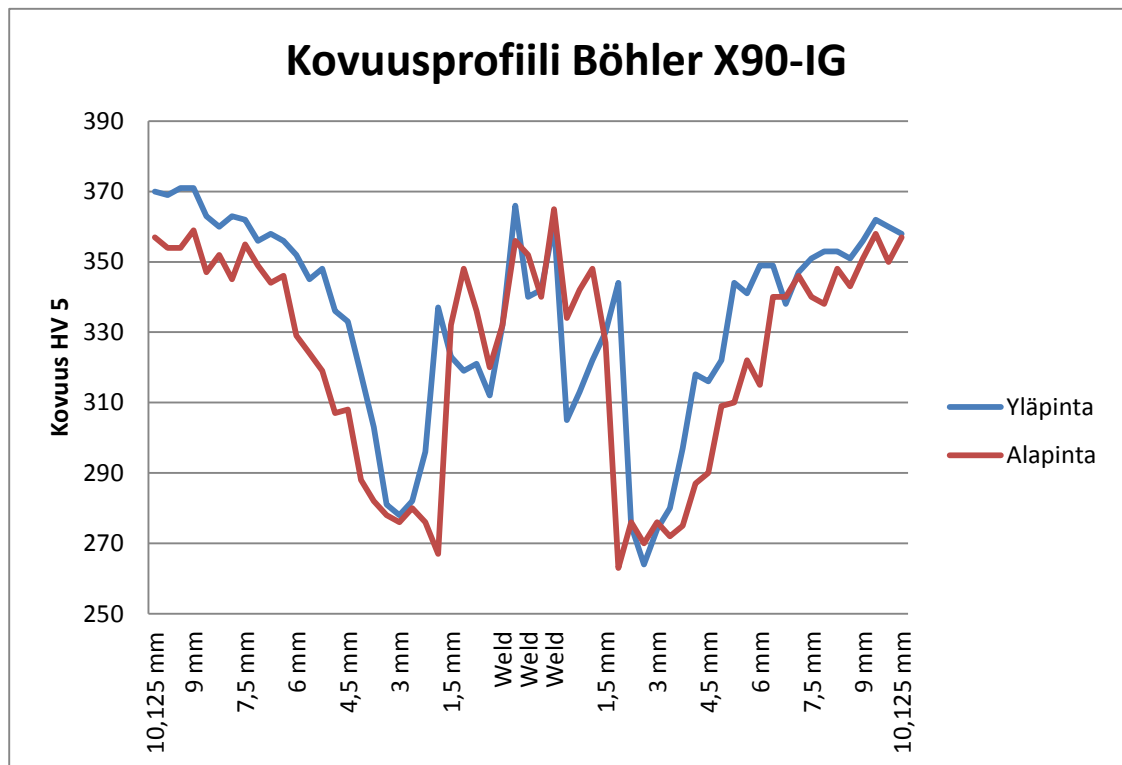
Kuva 38. OK Autrod 12.51 hitsisauman kovuusprofiili



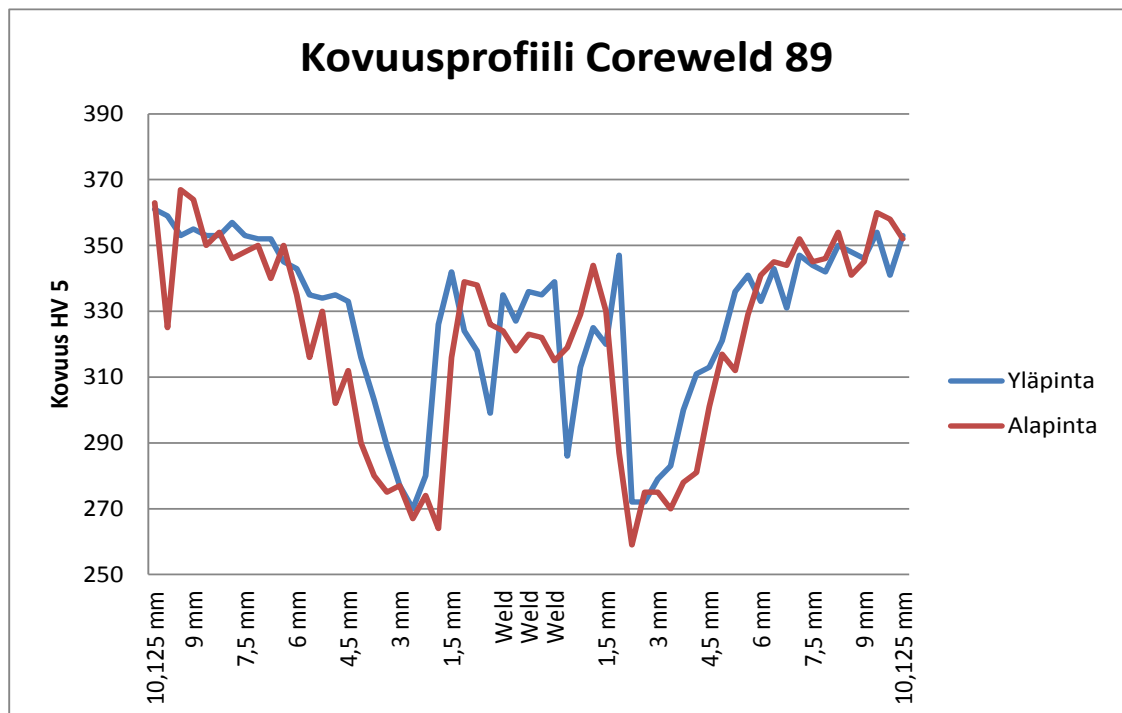
Kuva 39. Union X96 hitsisauman kovuusprofiili



Kuva 40. Aristorod 89 hitsisauman kovuusprofiili



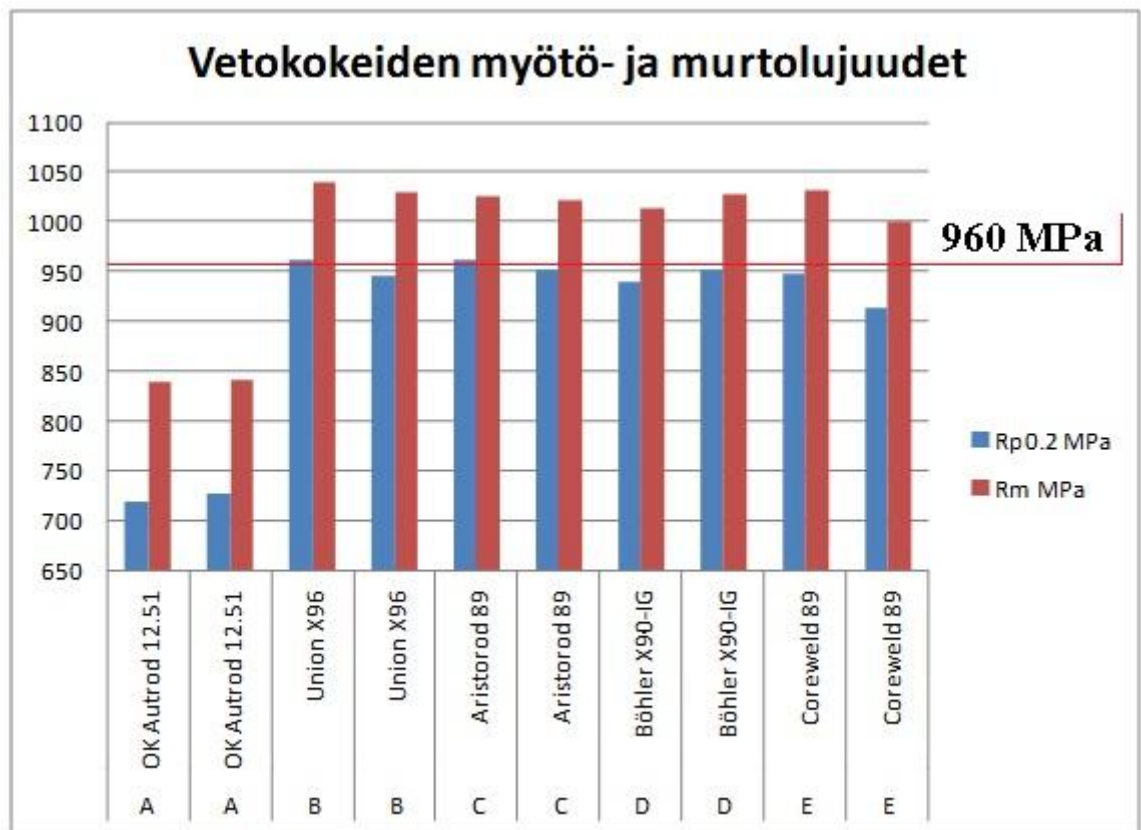
Kuva 41. Böhler X90-IG hitsisauman kovuusprofiili



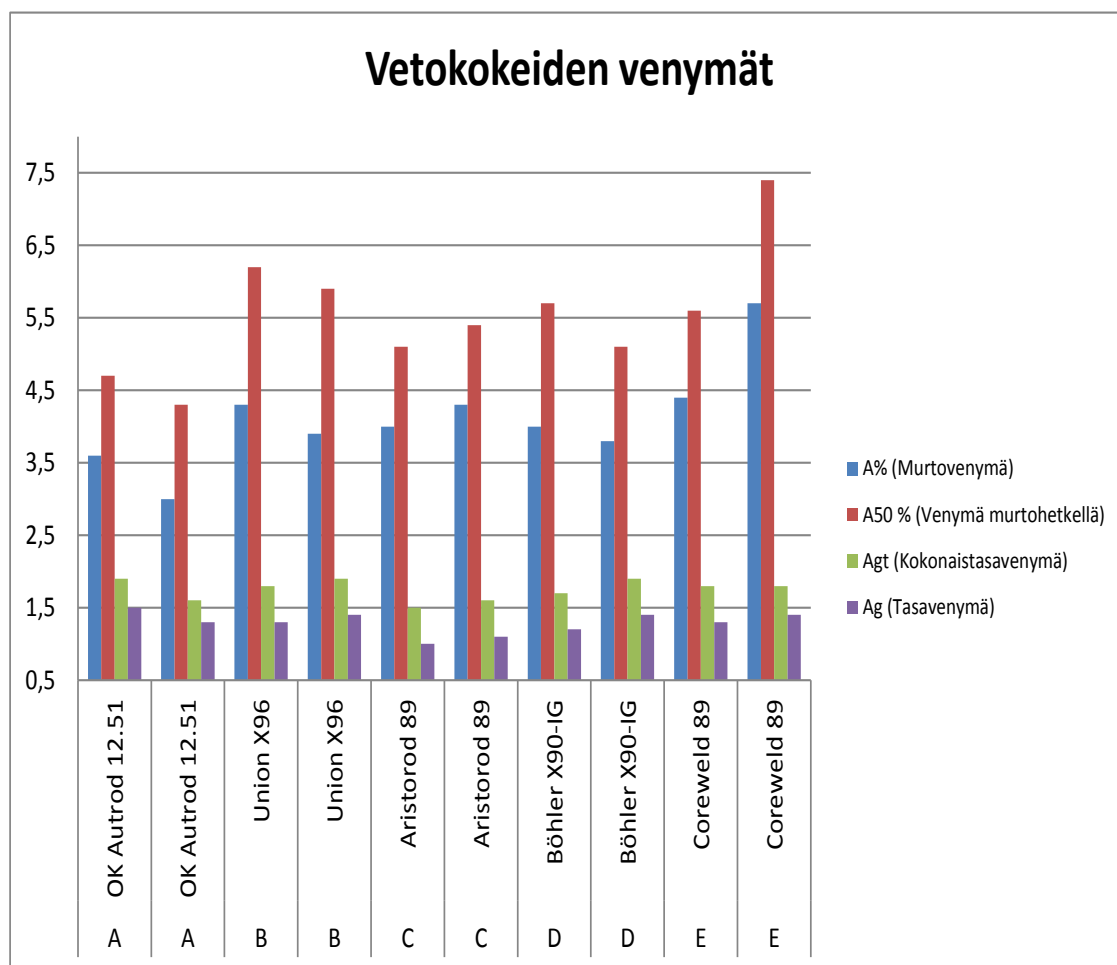
Kuva 42. Coreweld 89 hitsisauman kovuusprofiili

5.3. Vetokokeet

Hitsiliitoksien vetokokeet tehtiin Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Raahessa. Vetokokeet tehtiin poikittaisena vetokokeena standardin EN 895 mukaisesti. Vetokoesauvoja valmistettiin 2 kappaletta kustakin hitsisaumasta. Kaikista sauvoista hitsauskuvat jyrättiin pois. Kuvissa 43 ja 44 on vetokokeiden tulokset.



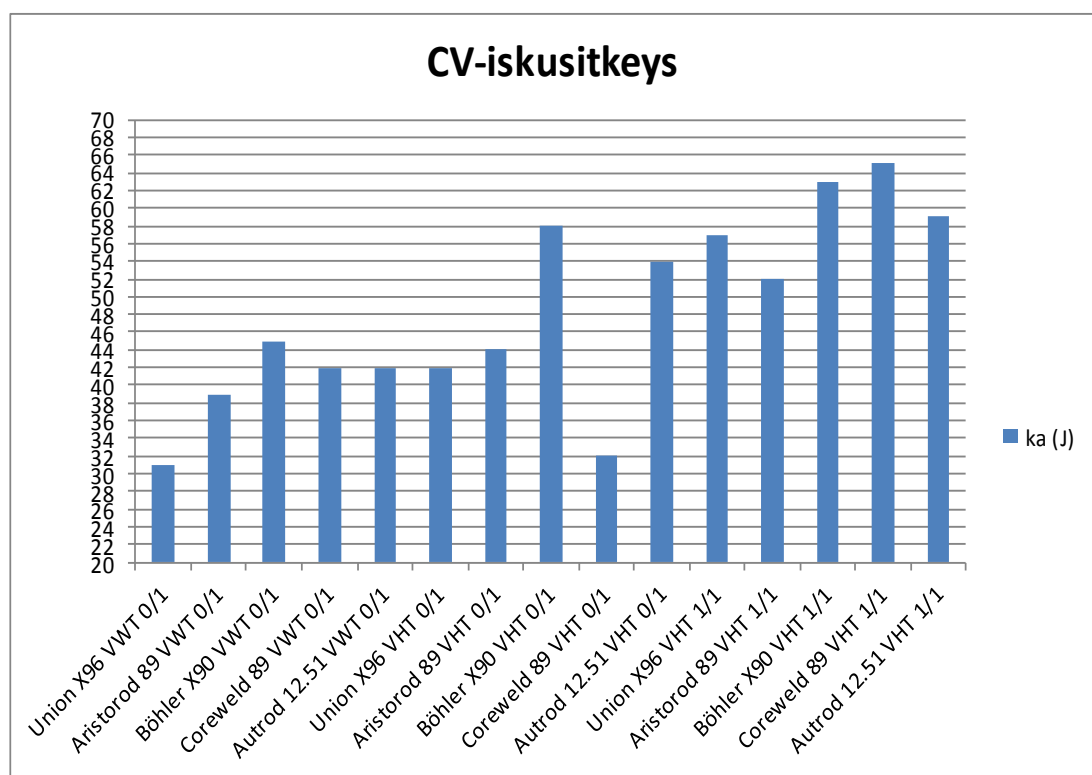
Kuva 43. Vetokokeiden myötö- ja murtolujuudet



Kuva 44. Vetokokeiden venymät

5.4. Iskukokeet

Hitsiliitoksien iskukokeet tehtiin Kemi-Tornion ammattikorkeakoulun rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Kemissä. Iskukokeet suoritettiin standardin mukaisesti -40 °C, koesauvoja jäähdytettiin kammiassa 30 minuuttia. Iskuvasara oli Charpy-V 300 joulea. Iskulovien paikat oli määritetty keskelle hitsiainetta, sularajalle ja sularaja + 1 mm. Iskulovet tuli koekappaleen pintaan nähden kohtisuorassa.



Kuva 45. CV-iskusitkeys tulosten keskiarvot

5.5. Taivutuskokeet

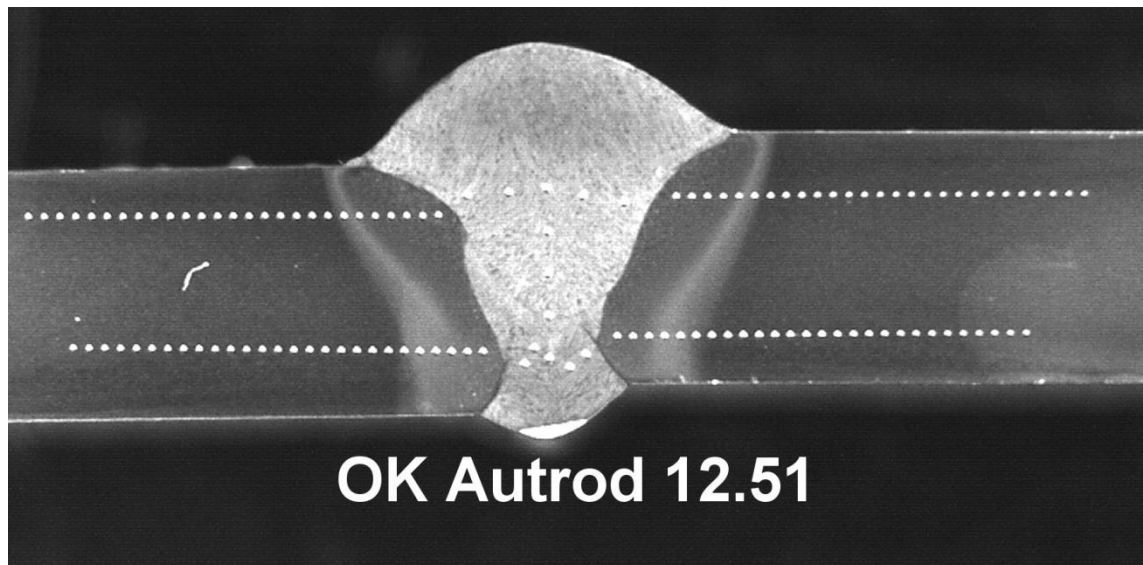
Hitsiliitoksien taivutuskokeet tehtiin Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa Raahessa. Poikittaiset taivutuskokeet suoritettiin sekä pinta- ja juuritaivutuksina. Taivutustuurnan halkaisija kokeissa oli 80 mm.

Taulukko 20. Taivutuskoetulokset

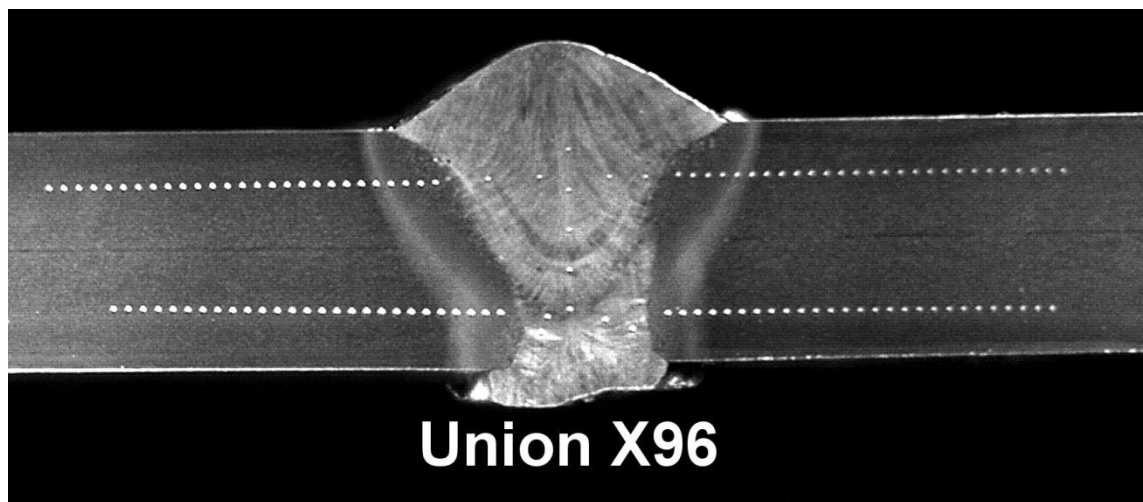
Näyte [] Sample []	(Juuri/pinta) (Root/surface)	Nro No.	Taivutustyyppi Type of specimen	Taivutuskulma [A°] Bending angle	Tulos Result	Murtuma Fracture
[A] OK Autrod 12.51	Pinta	1	⌀ 80 mm	180°	OK	OK
[A] OK Autrod 12.51	Pinta	2	⌀ 80 mm	180°	murt. 3*3mm	Hitsiaine
[A] OK Autrod 12.51	Juuri	3	⌀ 80 mm	92°	murt. 12mm, 4mm, 4*3mm, 3*2mm	Hitsiaine
[A] OK Autrod 12.51	Juuri	4	⌀ 80 mm	63°	murtunut koko matkalta	Hitsiaine
[B] Union X96	Pinta	5	⌀ 80 mm	180°	OK	OK
[B] Union X96	Pinta	6	⌀ 80 mm	180°	OK	OK
[B] Union X96	Juuri	7	⌀ 80 mm	180°	murt. 32/40mm	Sularaja
[B] Union X96	Juuri	8	⌀ 80 mm	180°	OK	OK
[C] Aristorod 89	Pinta	1b	⌀ 80 mm	180°	murt. 38/40mm	Sularaja
[C] Aristorod 89	Pinta	2b	⌀ 80 mm	180°	murtunut koko matkalta	Sularaja
[C] Aristorod 89	Juuri	3b	⌀ 80 mm	180°	murt. 1,5mm	Hitsiaine
[C] Aristorod 89	Juuri	4b	⌀ 80 mm	180°	murt. 2*5mm	Sularaja
[D] Böhler X90-IG	Pinta	5b	⌀ 80 mm	180°	murt. 32/40mm	Sularaja
[D] Böhler X90-IG	Pinta	6b	⌀ 80 mm	180°	murt. 32/40mm	Sularaja
[D] Böhler X90-IG	Juuri	7b	⌀ 80 mm	180°	murt. 4*1,5mm	Hitsiaine
[D] Böhler X90-IG	Juuri	8b	⌀ 80 mm	180°	murt. 10/40mm	Sularaja
[E] Coreweld 89	Pinta	1c	⌀ 80 mm	180°	murt. 3/40mm	Sularaja
[E] Coreweld 89	Pinta	2c	⌀ 80 mm	180°	murt. 35/40mm	Sularaja
[E] Coreweld 89	Juuri	3c	⌀ 80 mm	180°	murt. Noin 20/40mm	Sularaja
[E] Coreweld 89	Juuri	4c	⌀ 80 mm	180°	murt. 35/40mm	Sularaja

5.6. Makrohieet

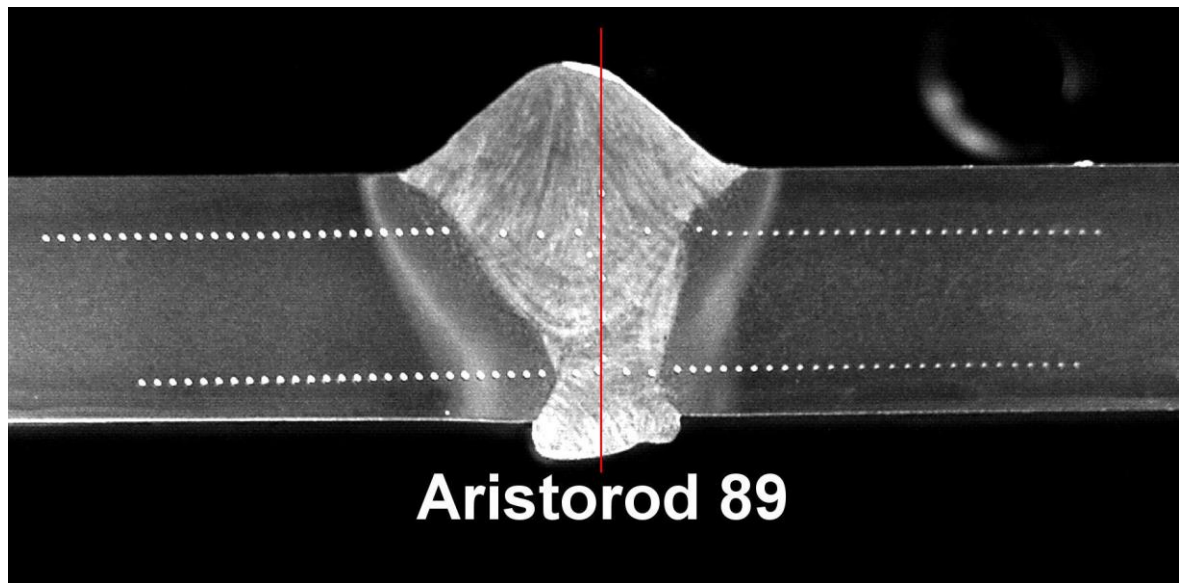
Hitsiliitoksien makrohieet valmistettiin Ruukin tehtaila Raahessa. Makrohie kuvista nähdään hitsiin tehdyt kovuusmittauspisteet jotka on myös tehty Ruukin rikkovan aineenkoetuksen laboratoriossa.



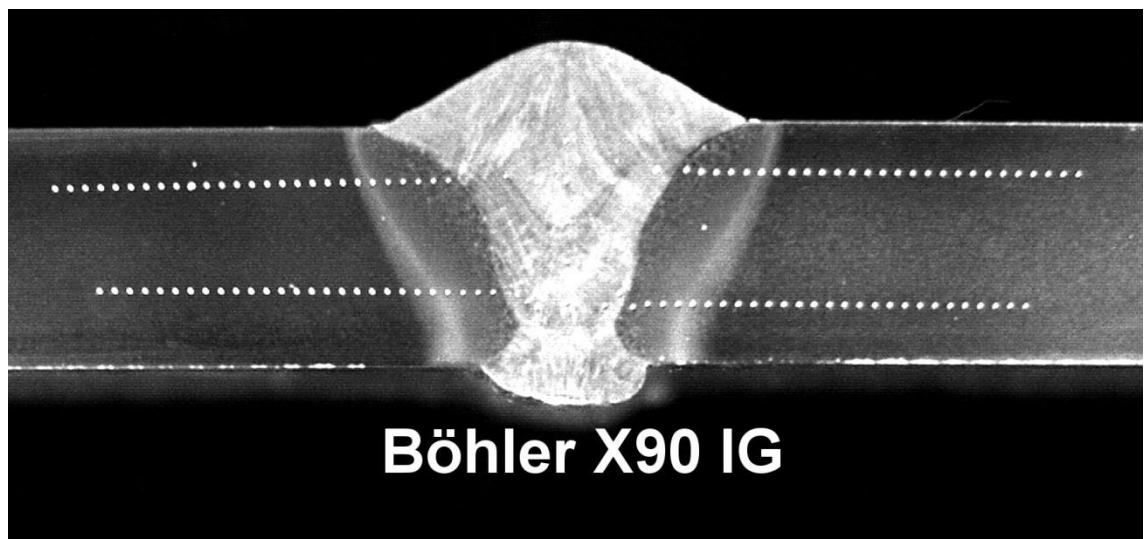
Kuva 46. OK Autrod 12.51 alilujalla umpilangalla hitsattu liitos ja siinä näkyvät kovuusmittaus pisteet



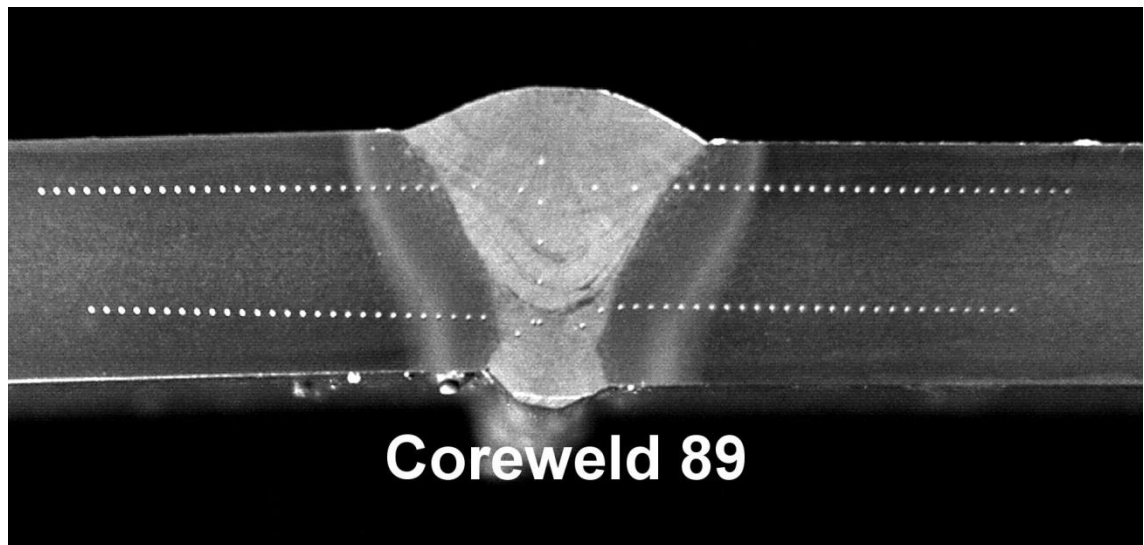
Kuva 47. Union X96 tasalujalla umpilangalla hitsattu liitos ja siinä näkyvät kovuusmittaus pisteet



Kuva 48. Aristorod 89 umpilangalla hitsattu liitos ja siinä näkyvät kovuusmittaus pisteet. Hitsin keskilinja merkattu punaisella, jolloin nähdään selvästi hitsin epäsymmetrisyys



Kuva 49. Böhler X90-IG umpilangalla hitsattu liitos ja siinä näkyvät kovuusmittaus pisteet



Kuva 50. Coreweld 89 täytelangalla hitsattu liitos ja siinä näkyvät kovuusmittaus pisteet

6. TULOSTEN TARKASTELU

Hitsauksien onnistumista ja tuloksia pohditaan koehitsauksien aikana ilmenneiden asioiden perusteella, silmämääräisen tarkistuksen perusteella ja rikkovien aineenkoetusten perusteella. Hitseille tehtiin myös mikrorakenne tutkimuksia FE-SEM ja EDS-laitteistolla.

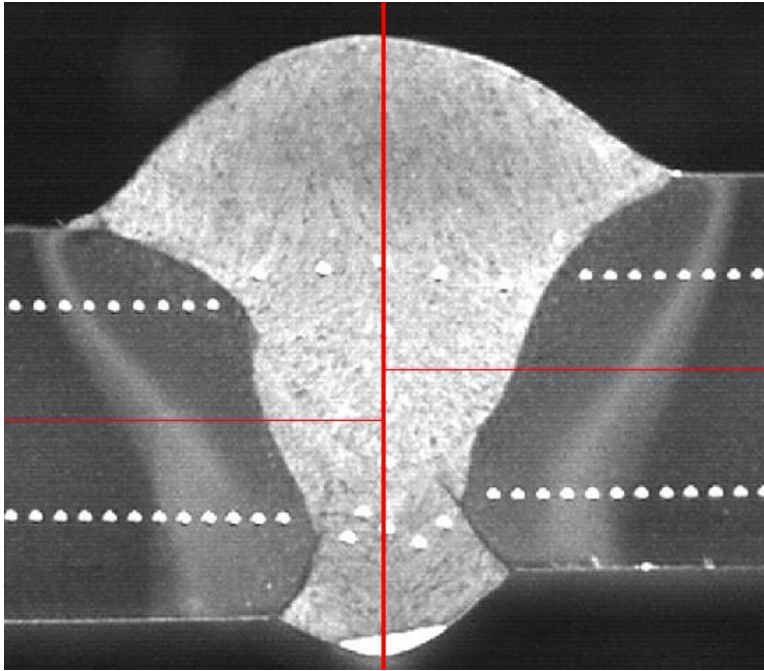
6.1. Hitsiliitosten kovuusmittaukset

Kovuusmittaukset tehtiin hitsiliitosten yli 1,5 mm etäisyydeltä perusaineen ylä- ja alapinnasta, paininvoimalla HV5. Mittaus aloitettiin sularajalta ja jatkettiin perusaineeseen jossa kovuus on noin 370 HV. Hitsiaineesta tehtiin viisi mittausta ylä- ja alapinnasta sekä viisi mittausta hitsin keskilinjasta. Mittapisteen etäisyys 0,375 mm. Pinta- ja juurimittaukset näkyvät kuvissa 46–50.

Kuvissa 38–42 on esitetty kaikkien viiden hitsisauman kovuusmittauksien kovuusprofiilit. Tasalujien hitsauslisäaineiden kovuus hitsissä on lähellä perusaineen tasoa, paitsi alilujalla lisäaineella hitsatussa saumassa. Tasalujissa hitseissä sularajalla on hieman pehmennyt kohta, karkearakeisella HAZ-alueella (CG HAZ) kovuus kasvaa ja osittain austenisoituneella vyöhykkeellä (ICHAZ) on hieman pehmeämpi vyöhyke. Alapalosta tehdyt mittaukset paljastavat että karkearakeinen HAZ-alue on noin puolet pienempi kuin yläpalossa, sekä osittain austenisoitunut vyöhyke ulottuu alapalossa pidemmälle perusaineeseen kuin yläpalossa. Syy tähän on juuripalon päälle hitsattu pintapalko, jonka aiheuttama toinen lämpösykli on pehmentänyt hitsin juuri osaa entisestään.

OK Autrod 12.51 kovuusprofiilia tarkastellessa huomataan, hitsiaineen kovuus on selkeästi perusaineen kovuutta alhaisempi ja kovuus kasvaa huomattavasti heti sularajalla. Tämä johtuu seostamattoman hitsinaineen ja seostetumman perusaineen sekoittumisesta. Molemmiin puolin pehmenneet vyöhykkeet syntyvät hitsausten aiheuttamasta lämpövaikutuksesta. Alapalon karkearakeinen HAZ-alue on kovuudeltaan lähellä yläpalon karkearakeista HAZ aluetta. Autrod 12.51 kovuusprofiilista nähdään myös että

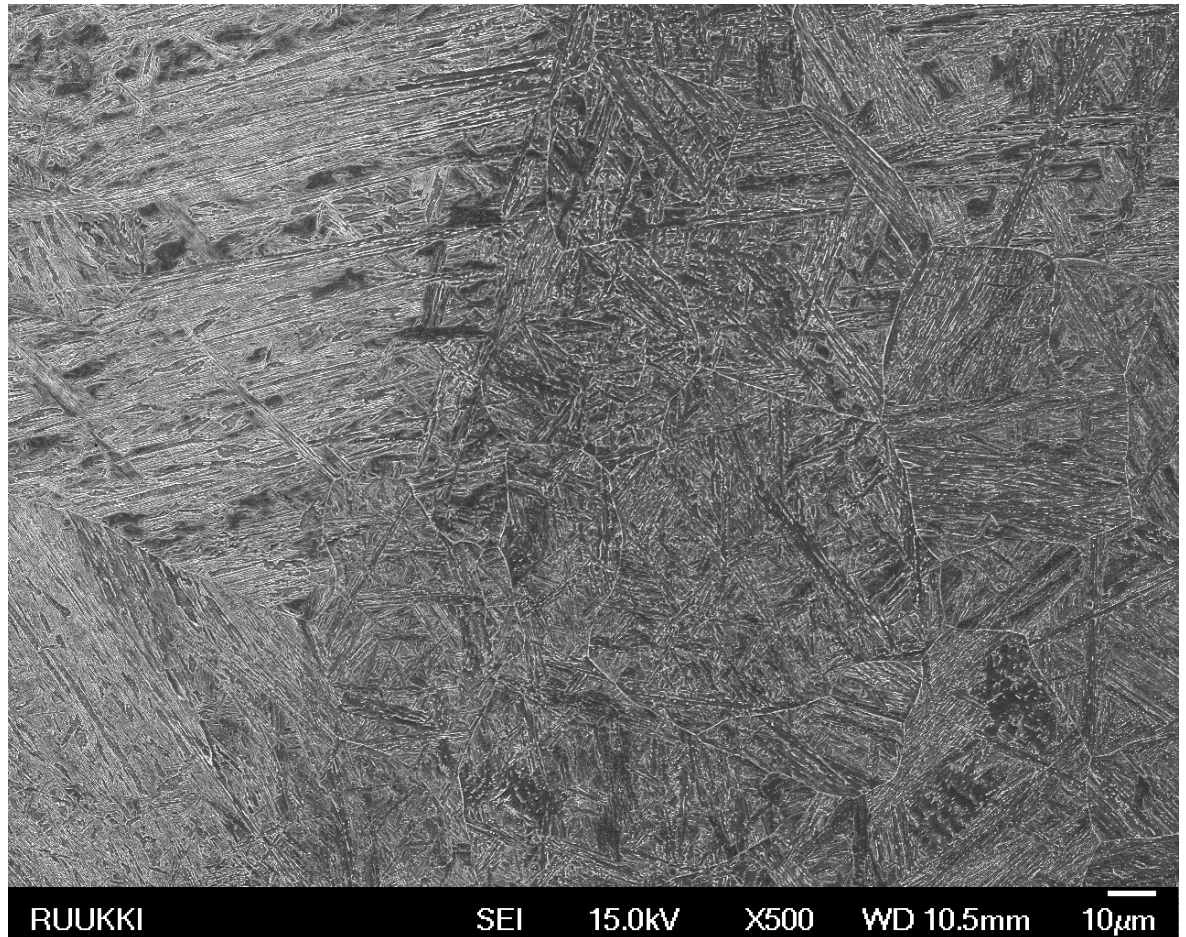
oikeanpuoleinen pehmeämpi vyöhyke ulottuu alapalossa pidemmälle kuin yläpalossa. Pintapalko ei ole merkittävästi kovempi kuin juuripalko. Kuvasta 51 nähdään että hitsi on suhteellisen symmetrinen, mutta levyt ovat huomattavasti erillä tasossa toisistaan. Hitsin kovuusprofiili käyttäytyi odotetusti.



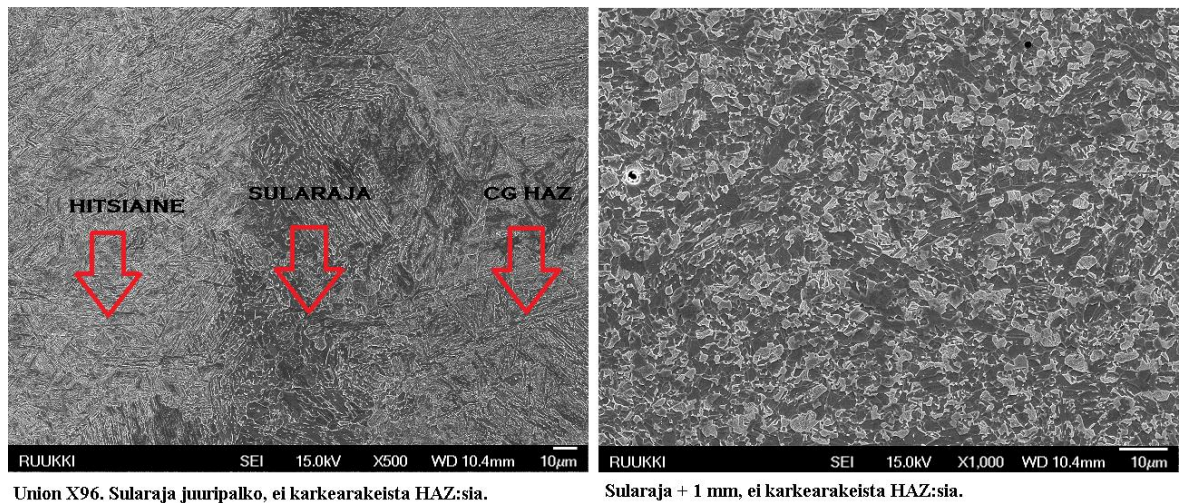
Kuva 51. OK Autrod 12.51 makrohie johon merkattu hitsin keskilinja ja levyjen keskilinjat

Union X96 kovuusprofiilista nähdään että yläpalon ja alapalon välillä on selvä kovuusero. Yläpalon sularaja on kovempi kuin alapalon sularaja kovuus. Kuvasta 39 voidaan nähdä, että Union X96 kovuusprofiilista puuttuu alapalon karkearakeinen HAZ-piikki. Yläpalon karkearakeinen HAZ-alue on hyvin tavanomainen, alapalon kovuusmittauksista käy ilmi, ettei selvää karkearakeista HAZ-aluetta ole. Kuvassa 53 on FE-SEM mikrorakennekuva Union X96 juuripalon sularajalta, siitä nähdään että karkearakeinen HAZ-alue puuttuu. Juuripalon kovuusmittaukset on todennäköisesti tehty juuri- ja pintapalon lämpövyöhykkeiden risteyskohdasta, mistä johtuen kovuusmittaus tulokset antavat alapalolle huomattavasti pehmeämmän kovuuden. Pintapalon hitsaaminen juuripalon päälle on alentanut juuripalon hitsiaineen ja karkearakeisen vyöhykkeen kovuutta. Kuvassa 54 on Union X96 yläpalon mikrorakenne sularajalta ja sularaja + 1 mm. Kuvasta nähdään, että yläpalosta löytyy normaali karkearakeinen HAZ-alue. Alapalon suureen

hienorakeiseen HAZ-alueeseen on myös vaikuttanut palkojen sijainti. Hitsin risteyskohtaan on vaikuttanut molempien palkojen lämmöntuonti ja mikrorakenne on muuttunut alueella hajonneeksi bainiitiksi. Kovuus lämpövyöhykkeiden risteyskohdassa vaihtelee välillä 270–280 HV. Kuvassa 52 FE-SEM mikrorakenne kuva lämpövyöhykkeiden risteyskohdasta.



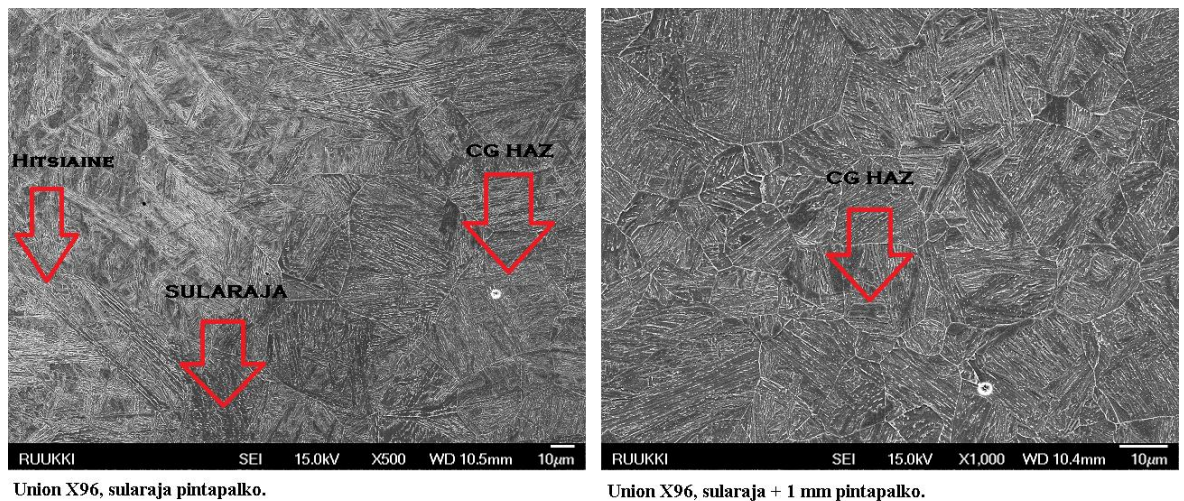
Kuva 52. Union X96 FE-SEM kuva lämpövyöhykkeiden risteyskohdasta



Union X96. Sularaja juuripalko, ei karkearakeista HAZ:sta.

Sularaja + 1 mm, ei karkearakeista HAZ:sta.

Kuva 53. Union X96 FE-SEM kuva, juuripalko sularaja ja sularaja + 1 mm. Karkearakeista HAZ-aluetta ei ole juuripalton puolella, koska pintapalton hitsaaminen on lämpökäsitellyt sen



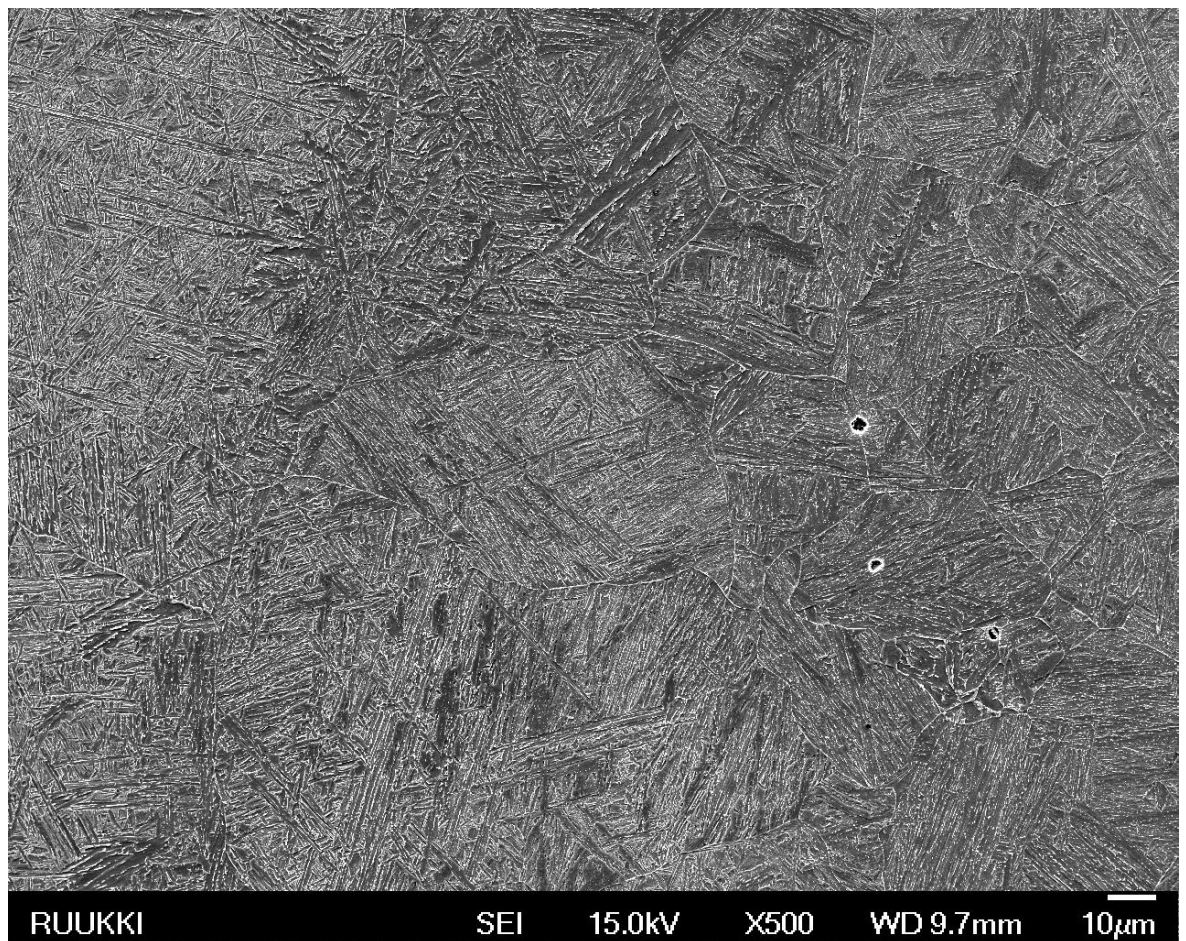
Union X96, sularaja pintapalko.

Union X96, sularaja + 1 mm pintapalko.

Kuva 54. Union X96 FE-SEM kuva, pintapalko sularaja ja sularaja + 1 mm. Normaali karkearakeinen HAZ-alue

Aristorod 89 kovuusprofiilista ja hitsiaineesta otetuista kovuusmittauksista huomataan, että pintapalko on kovempi kuin hitsiaineen juuripalko, eroa on paikoin noin 30 HV. Pintapalton hitsaaminen juuripalton päälle on lämpökäsitellyt juuripalton hitsiaineen ja HAZ-vyöhykkeet. Ylä- ja alapinnan karkearakeisella HAZ-vyöhykkeellä kovuudet ovat suunnilleen samaa luokkaa paitsi alapinnassa hitsin oikealla puolella. Hitsin vasemmalla puolella oleva karkearakeinen ja hienorakeinen HAZ-vyöhyke on samaa kovuusluokkaa. Muuten kovuusprofiili mukailee samoja tuloksia, hitsin alapinnan lämpövyöhyke on

suurempi kuin yläpinnassa näin ollen pehmeämpi alue on suurempi alapinnassa kuin yläpinnassa. Aristorod 89 mikrohiekuvasta 48 voidaan myös havaita että juuri- ja pintapalkojen sijainti ei ole sattunut samaan linjaan ja että lämpövaikutusalueet ovat epäsymmetrisiä. Kuvassa 40 on esitetty Aristorod 89 kovuusprofiili ja siitä voidaan nähdä selvä ero oikean puoleisessa karkearakeisessa HAZ:ssa. Toisin kuin yläpintaan, alapintaan ei tule karkearakeista HAZ piikkiä. Kun tarkastellaan oikeanpuolen lämpövyöhykkeiden risteyskohdan mikrorakennetta, (kuva 55) voidaan sieltä havaita kahteen kertaan lämpökäsitelty alue joista on tullut uudelleen osittain austenisoitunut karkearakeinen HAZ-alue.



Kuva 55. Aristorod 89, elektronimikroskoopilla otettu mikrorakenne kuva palkojen risteyskohdasta. Pintapalon vaikutuksesta kaksi kertaa sulana käynyt karkearakeinen HAZ-alue, josta on muodostunut osittain austenisoitunut karkearakeinen HAZ

Böhler X90 kovuusprofiilia ja hitsiaineesta otetuista kovuusmittauksista selviää, ettei suuria eroja ole hitsiaineen kovuuksissa ylä- ja alapinnassa. Sularaja kovuus alapinnassa on suurempi kuin yläpinnassa, mutta mitään suuria eroja ei ole havaittavissa. Alapintojen karkearakeinen HAZ-alue on kapeampi ja kovempi kuin yläpinnan karkearakeinen HAZ-alue. Yläpinnan karkearakeinen HAZ-alue ulottuu kauemmaksi. Alapinnan osittain austenisoitunut vyöhyke on laajempi kuin yläpinnassa, tähän on jälleen vaikuttanut juuripalon päälle hitsattu pintapalko joka on pehmentänyt alapintaa ja kaventanut karkearakeista HAZ-aluetta sekä laajentanut hienorakeista HAZ-aluetta. Alapalosta otetut kovuusmittaukset onnistuivat hyvin ja olivat identtiset molemmin puolin.

Coreweld 89 kovuusprofiilia ja hitsiaineesta otetuista kovuusmittauksista selviää, että pintapalko on reilut 10 HV:ta kovempi kuin hitsiaineen juuripalko. Sularajalla alapinta on kovempi kuin yläpinnan sularaja. Alapinnan karkearakeinen HAZ-alue on samaa tyyppiä kuin muissakin, se on hieman kovempi kuin yläpinnan karkearakeinen sekä pienempi. Ylä- ja alapintojen hienorakeinen HAZ-alue on kovuudeltaan samaa luokkaa.

Tasalujissa liitoksissa sularajan kovuudet vaihtelee välillä 250–334 HV. Tasalujissa hitsisaumoissa yläpinnan karkearakeisen HAZ-alueen kovuus vaihtelee välillä 300–350 HV, alilujassa hitsisaumassa kovuus on karkearakeisessa HAZ alueessa 280–320 HV. Tasalujissa hitsisaumoissa yläpinnan osittain austenisoituneen HAZ-alueen kovuus vaihtelee välillä 240–280 HV, alilujassa hitsisaumassa osittain austenisoituneen HAZ-alueen kovuus vaihtelee välillä 260–270 HV. Union X96 kovuusprofiilista kuvassa 39 nähdään, että se on ainoa joka eroaa muista, koska hitsin alapinnasta otetusta kovuudesta puuttuu karkearakeinen piikki. Piikki puuttuu alapinnasta, koska pintapalon hitsaaminen juuripalon päälle on alentanut juuripalon hitsiaineen ja karkearakeisen vyöhykkeen kovuutta.

6.2. Vetokokeet

Poikittaisten vetokoetulosten myötö- ja murtolujuudet on esitetty kuvassa 43 ja venymät kuvassa 44. Vetokoesauvoja tehtiin yhteensä kymmenen, kaksi kustakin hitsistä. Vetosauvat olivat standardin mukaisia lattavetosauvoja. Kaikista sauvoista kuvut oli jyrstetty pois.

Kuvasta 43 ja taulukosta 21 nähdään, että kahdella lisäaineella saavutettiin vetokokeissa perusaineen nimellislujuus ($R_{p0,2}=960\text{MPa}$). Union X96 langalla päästiin hyvään tulokseen ja toisen hyvän tuloksen kokeissa antoi Aristorod 89, lujuusluokan 89 lisäainelanka. Union X96 langan hyvät tulokset vetokokeissa johtuvat todennäköisesti lisäainelangan muita lankoja korkeammasta hiilipitoisuudesta. Coreweld 89 eroaa Union X96 lisäainelangan kemiallisesta koostumuksesta lähinnä hieman matalamman hiilen osalta. Tuloksia tarkastellessa huomataan että lujilla lisäaineella päästiin kaikilla yli 910MPa. Kaiken kaikkiaan tulokset olivat lähellä toisiaan ja merkittäviä eroja ei löytynyt,

Taulukko 21. Vetokokeiden tulokset taulukoituna

Näyte [A,B,C,D,E] Lisäainelanka	$R_{p0,2}$ MPa	R_m MPa
[A] OK Autrod 12.51	719	840
[A] OK Autrod 12.51	726	841
[B] Union X96	961	1039
[B] Union X96	946	1030
[C] Aristorod 89	962	1026
[C] Aristorod 89	951	1022
[D] Böhler X90-IG	939	1014
[D] Böhler X90-IG	951	1028
[E] Coreweld 89	948	1031
[E] Coreweld 89	913	1000

Kun tarkastellaan vetosauvojen murtokohtia voidaan havaita, että seitsemän sauvaa kymmenestä katkesi HAZ:sta, kaksi hitsiaineesta ja yksi sularajalta. Kaksi HAZ:sta murtunutta sauvaa saavutti perusaineen nimellislujouden. Ainoa sularajalta katkennut sauva oli hitsattu Union X96 langalla. Molemmat hitsiaineesta katkenneet sauvat oli hitsattu alilujalla OK Autrod 12.51 lisäaineella.

Alilujalla 12.51 lisäainelangalla hitsatut liitokset katkesivat mistä niiden odotettiin, eli perusainetta pehmeämmästä hitsiaineesta. Seitsemän vetosauvaa kymmenestä katkesi HAZ:sta, tämä johtuu siitä että pehmennyt vyöhyke syntyy osittain austenisoituneeseen HAZ:iin. hitsiaineen ja perusaineen ollessa tasalujia. Union X96 sauvojen vetokokeissa toisessa vedossa päästiin yli perusaineen nimellislujuuden. Paremman tuloksen antanut vetosauva oli katkennut HAZ-alueelta, heikomman tuloksen antanut sauva oli katkennut sularajalta. Voidaan päätellä että sularajalta alkanut murtumiskohta ja katkeaminen on antanut vetokokeessa huonomman tuloksen kuin kapealta hieman pehmenneeltä ICHAZ-alueelta alkanut murtuma.

Vetokoetulokset lukuun ottamatta alilujaa lisäainelankaa olivat tasaisia, suuria eroja ei syntynyt myötö- ja murtolujuuksissa eikä venymissä. Tähän vaikuttivat kaikkein eniten tasalujien hitsauslisäaineiden pienet keskinäiset koostumuserot ja hitsauksissa käytetyt parametrit jotka olivat kaikissa samat, lukuun ottamatta Coreweld 89 lankaa, jota hitsattaessa käytettiin pienempää hitsausvirtaa roiskeiden estämiseksi. Kaarienergia $E=0,57$ kJ/mm saavutettiin lähes jokaisessa pintapalossa. Juuripaloissa kaarienergia vaihteli arvoissa 0,32–0,37 kJ/mm.

6.3. Iskukokeet

Iskukokeet tehtiin -40 asteen lämpötilassa 5x10x55 mm kokoisilla koesauvoilla hitsin keskeltä hitsiaineesta, sularajalta ja sularaja + 1 mm. Taulukosta 2 nähdään Optim 960 QC -teräksen mekaaniset ominaisuudet ja että CV-iskusitkeyden raja-arvo 10x10x55 mm kokoisilla koesauvoilla on 27J, kun taas 5x10x55 mm kokoisilla koesauvoilla joule määrä puolitetaan arvoon 14J. Taulukosta 22 nähdään että kaikki iskukoetulokset ylitti 14 joulen raja-arvon selvästi. Täydelliset iskukoetulokset liitteessä 5.

Taulukko 22. CV-iskukokeiden tulokset

	ka [J]				
loven paikka	OK Autrod 12.51	Union X96	Aristorod 89	Böhler X90	Coreweld 89
VWT 0/1	42	31	39	45	42
VHT 0/1	54	42	44	58	32
VHT 1/1	59	57	52	63	65

Kun tarkastellaan sularajan iskutkeys tuloksia, huomataan että Coreweld 89 antoi keskiarvoissa huonoimman tuloksen sularaja loven kohdassa. Muilla langoilla keskiarvot kasvoivat. Coreweldin huonoja tuloksia sularajan iskutkeys kokeissa on vaikea arvioida. Hitsiliitoksessa on voinut olla jäänteitä epäpuhtauksista jotka ovat saaneet aikaan heikon kohdan sularajalle. Coreweld 89 hitsisauman profiili on yksi parhaista, palot ovat sijoittuneet onnistuneesti. Hitsisauman epäsymmetrisyys ei ole vaikuttanut sularajalle huonontavasti. EDS-alkuaineanalysointorilla voitaisiin tehdä jatkotutkimuksia ja selvittää seostuksen koostumus tarkasti sularajalla. Näin nähtäisiin oliko sularajalle muodostunut jotain tiettyä alkuainetta enemmän, jolla olisi ollut merkittävä vaikutus iskutkeys ominaisuuksiin -40 °C asteessa.

Tulokset pitävät yhtä kovuusprofiilien kanssa, sularajalle (VHT 0/1) sijoittui pehmeämpi kohta iskukokeissa kuin karkearakeiselle HAZ:lle (VHT 1/1). Aristorod 89 ja Coreweld 89 oli kaksi huonointa lankaa sularajan iskukokeissa, joule määrät kasvoivat näissä iskuissa vain Aristorodissa keskiarvoisesti 5 joulea. Coreweld 89 kovuusprofiilista nähdään että selkeästi pehmeämpi sularaja yläpinnalla on voinut olla syynä huonoihin iskutuloksiin sularajalla. Lisäainelankojen sisältämät koostumukset eivät ole vaikuttaneet huomattavasti huonontaan iskukoearvoja. Union X96 oli huonoin lanka iskukokeissa, mutta antoi hyvän tuloksen taivutuskokeissa. Union X96 hitsauslisäainelangan koostumus antaa langalle paremman muovattavuuden kuin keston iskukokeissa. Langan korkea hiilipitoisuus saattaa olla yksi mahdollinen tekijä tässä asiassa. Hieman korkeampi hiilipitoisuus todennäköisesti huonontaa iskutkeyksiä, mutta parantaa hitsin lujuutta ja siten myös taivutettavuutta. Taivutuskokeissa Union X96 lisäainelanka omaakin valmistajan mukaan hyvän muodonmuutoskyvyn.

Murtopintojen tarkastuksessa ei havaittu huokosia jotka olisivat vaikuttaneet tuloksiin. Sitkeän ja hauraan murtuman osuuksista kaikki murtumat olivat suurimmaksi osaksi murtopinta-alaltaan sitkeää murtumaa. Tulos on hyvä tältäkin osin.

6.4. Taivutuskokeet

Poikittaiset taivutuskokeet tehtiin sekä pinta- ja juuritaivutuksina. Jokaiselle hitsatulle saumalle tehtiin kaksi pintataivutusta, sekä kaksi juuritaivutusta. Näyteleveys 40 mm, näytteet on irrotettu sahaamalla. Taivutustuurnan halkaisija 80 mm ja taivutuskulma 180°. Taivutuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 20.

OK Autrod 12.51 kahdessa pinta taivutuksessa päästiin tuloksiin 180°. Ensimmäinen pinta taivutussauva oli tulokseltaan hyvä, murtumia ei havaittu hitsiaineessa. Toisessa pinta taivutussauvassa päästiin myös 180° taivutuskulmaan ja hitsiaineeseen tuli kolme murtumakohtaa, pituudeltaan kaikki 3 mm.

Kuvassa 56 on ensimmäinen OK Autrod 12.51 juuritaivutussauva, siitä voidaan nähdä että kaikki voima on kohdistunut itse alilujan hitsausaumaan joka on antanut periksi. Vertailu kohteena kuvassa 57 on tasalujalla Union X96 hitsauslisäaineella hitsattu taivutuskoesauva josta nähdään että taivutusvoimat ovat vaikuttaneet myös perusaineeseen ja antaneet U-muodon. Ensimmäisessä juuri taivutuksessa päästiin tulokseen 92° ja erikokoisia murtumia tuli hitsiaineeseen yhdeksän. Toisessa juuri taivutuksessa hitsiaine murtui koko matkalta ja taivutus pysäytettiin 63° asteen kohdalla.

OK Autrod 12.51 taivutuskoe tuloksista huomataan että pinta kesti taivuttamista paremmin kuin juuri. Tämä johtuu juureen vaikuttaneesta pintapalon lämmöntuonnista. Pintapalko on hitsattu suuremmalla lämmöntuonnin arvolla ja on pinta-alaltaan suurempi. Hitsiainetta lujempi perusmateriaali ei ole antanut periksi ja kaikki taivutusvoima on keskittynyt pehmeämpään hitsiaineeseen juuressa. Tästä johtuen lopullista taivutuskulmaa 180° ei ole saavutettu.



Kuva 56. OK Autrod 12.51 juuri taivutus

Union X96 pinta taivutuksissa molemmissa päästiin hyvään tulokseen. Murtumia ei havaittu ja taivutuskulma 180° saavutettiin. Juuri taivutuksissa ensimmäiseen sauvaan tuli 180° taivutuksessa 32 mm murtuma sularajalle. Union X96 kovuusprofiilista nähdään että alapinnan karkearakeinen HAZ-alue on jäänyt yläpintaa pehmeämmäksi, tähän on vaikuttanut pintapalon lämmöntuonti. Murtuma kohta on syntynyt pehmenneelle sularajalle. Toinen juuri taivutus oli tulokseltaan hyvä, murtumia juuresta ei löydetty. Kaikkiaan taivutuksissa Union pärjäsi tuloksien osalta parhaiten, ainoastaan yhdessä taivutuksessa neljästä tuli murtumaa, sekin sijoittui juuren puolelle joka on kovuusprofiililtaan pehmeämpi. Kuvassa 57 Union X96 pinta taivutussauva.



Kuva 57. Union X96 pinta taivutussauva

Aristorod 89 pinta taivutuksissa murtumat sijoittui molemmissa sularajalle. Ensimmäisessä sauvassa murtuma sularajalla oli 38 mm ja toinen sauvaa oli murtunut koko matkalta. Murtumien sijainti ja koko on lähes identtinen. Aristorod 89 kovuusprofiilista nähdään että hitsiaineen kovuus on selvästi suurempi kuin karkearakeisella HAZ vyöhykkeellä. Näin ollen murtuman todennäköisin sijoittuminen on juuri sularajan pehmeälle vyöhykkeelle. Juuri taivutuksessa ensimmäisessä sauvassa murtumaa syntyi hitsiaineeseen, murtuman pituus hitsiaineessa 1,5 mm. Toisessa juuri taivutussauvassa murtumaa syntyi sularajalle. Murtumia tuli kaksi pituudeltaan molemmat 5 mm. Kovuusprofiilia tarkastellessa huomataan että hitsiaineen alapinnasta otetut kovuusmittaukset antavat tulokseksi noin 20 HV pienemmän kovuuden kuin yläpinnassa. Tämän takia voi olla mahdollista että 1,5 mm murtuma on päässyt syntymään hitsiaineeseen. Mahdolliset huokokset ja epäpuhtaudet hitsissä ovat myös mahdollisia, sillä murtuma hitsiaineessa on yksittäinen. Sularajalle syntyneet murtumat johtuvat todennäköisesti reunahaavasta. Hitsisauman profiili on epäsymmetrinen eli pintapalko on kohdistunut eriin kohtaan juuripalkoon nähden ja tämä on aiheuttanut sen että oikeanpuolen juuren HAZ-alue on saanut suuremman lämmöntonon kuin vasenpuoli. Kuvasta 48 voidaan nähdä palkojen epäsymmetrisyys ja

kuinka lämmöntuonti on vaikuttanut enemmän oikealle puolelle hitsiä. Voidaankin olettaa että murtumat ovat syntyneet hitsin oikealle puolelle mihin lämmön tuonti on vaikuttanut enemmän.

Böhler X90-IG umpilangalla hitsattuihin pinta taivutussauvoihin molempiin murtuma tuli sularajalle. Molemmissa pintataivutuksissa murtuman pituus oli 32 mm, pintataivutuksissa päästiin 180° asteeseen. Molemmissa tapauksissa murtuma syntyi hitsiainetta ja perusainetta pehmeämmälle osittain austenisoituneelle HAZ vyöhykkeelle, kovuusero on havaittavissa kovuusprofiilista. Juuri taivutuksessa ensimmäiseen sauvaan murtumia tuli hitsiaineeseen yhteensä neljä, kaikki pituudeltaan 1,5 mm. Toiseen juuri taivutussauvaan tuli murtuma sularajalle, pituudeltaan 10 mm. Hitsiaineen murtumat ovat todennäköisesti syntyneet pehmeimpään kohtaan hitsiaineessa, sularajan murtumat ovat tavanomaisia koska ne sijoittuvat jo tiedetylle pehmenneelle vyöhykkeelle hitsiaineen ja osittain austenisoituneen HAZ:in välissä. Hitsiaineen halkeamia on vaikea määrittää lisäaineiden koostumusten mukaan, koska Böhler X90 omaa hyvän muokkaantumiskyvyn taivutuksissa. Saumassa on voinut olla esimerkiksi mikroskooppinen särö josta halkeama hitsiaineeseen on päässyt syntymään taivutuksessa.

Coreweld 89 pintataivutuksissa tuli ensimmäiseen sauvaan 3 mm halkeama sularajalle ja toiseen pintataivutussauvaan sularajalle 35 mm halkeama. Pinnan kovuusprofiilista nähdään että osittain austenisoitunut ICHAZ on selvästi pehmeämpi kuin karkearakeinen HAZ-alue ja hitsiaine. Murtuma sijoittui tässäkin tapauksessa pehmeimpään kohtaan hitsissä. Halkeamien kokoero on huomattava, toinen sauva pärjasi taivutuksessa paljon paremmin. Syitä halkeamien kokoeroihin on vaikea arvioida. Juuritaivutuksien osalta molempiin sauvoihin murtumat tuli sularajalle, suuruudeltaan halkeamat ovat 20 mm ja 35 mm. Alapinnalta mitatut sularajan kovuusarvot ovat yläpintaa paremmat. Mittapisteiden sijainti kuitenkin vaihtelee, jos tutkitaan kuvaa 50, niin yläpinnan mittapisteet ovat ehkä hieman lähempänä varsinaista sularajaa kuin alapinnan. Tämä voi olla syynä ylä- ja alapinnan kovuuserolle.

6.5. Makrohieet

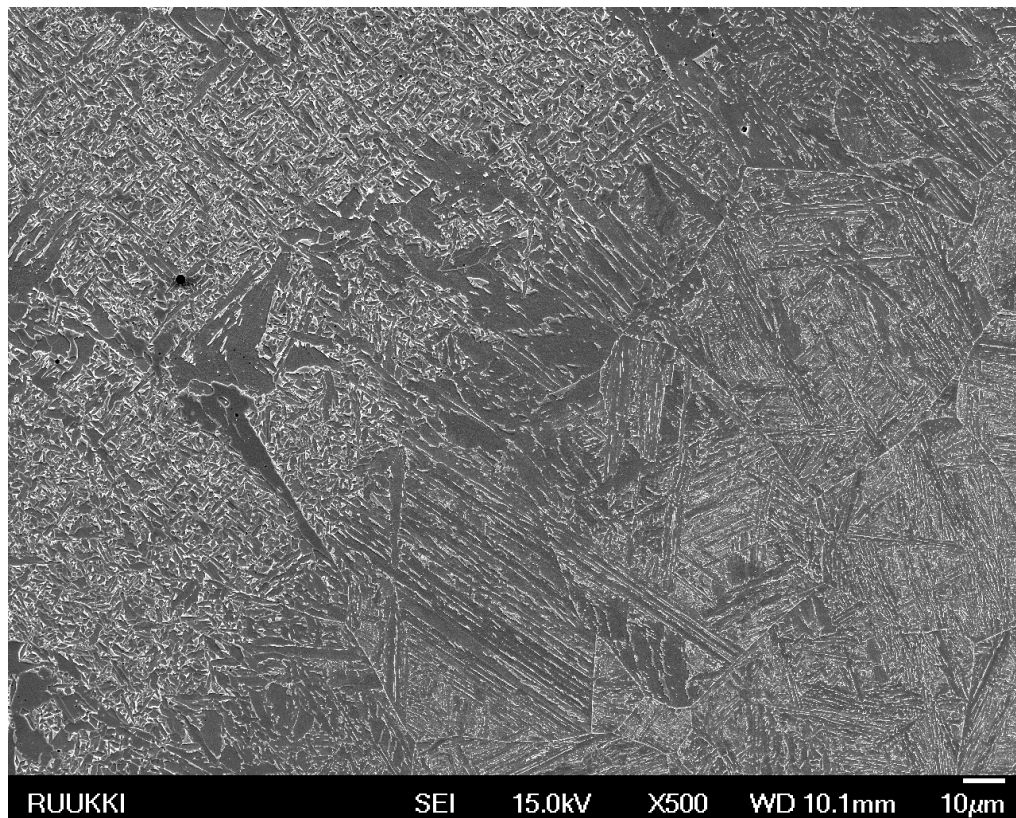
Hitsiliitosten makrokuvat joissa näkyy kovuusmittauspisteet ovat esitettynä kuvissa 44–48. Kuvista nähdään hyvin juuripalon ja pintapalon sijoittumiset saumassa, sekä palkojen muodostamien lämpövyöhykkeiden laajuus ja symmetrisyys. Juuripalot ja pintapalot hitsattiin samoilla virran arvoilla, paitsi Coreweld 89 langalla pienemmillä arvoilla johtuen roiskumisesta. Kaarienergian arvot pintapaloissa oli kaikissa samat, samoin juuripaloissa päästiin samoihin kaarienergian arvoihin. Kuljetin nopeus kaikissa pintahitseissä oli 390 mm/min pienempi kuin juuripaloissa käytetty. Kuljetin nopeutta hidastamalla saatiin pintapaloon suurempi kaarienergia ja näin ollen suurempi lämmöntuonti. Makrokuvista nähdään että juuripalon hitsiaineen pinta-ala jäi pienemmästä lämmöntuonnista johtuen myös pienemmäksi. Juuripalon muodostamaa lämpövyöhykettä ei juurikaan kuvista nähdä, koska juuripalon lämmöntuonti on erittäin pieni ja lisäksi pintapalon lämmöntuonti on lämpökäsitellyt juureen syntyneen lämpövyöhykkeen. Palkojen risteyskohtaan on syntynyt lämpövyöhykkeiden päällekkäisyys, joka muodostaa viinilasimaisen lämpövyöhykkeen. Aristorod 89 makrokuvasta nähdään palkojen geometrian epäsymmetrisyys, juuripalko ja pintapalko on hitsattu eri kohtiin. Pintapalkojen kohdistuminen väärin on aiheuttanut sen, että lämpökäsittely on kohdistunut enemmän hitsisauman oikeaan laitaan ja on aiheuttanut suuremmalla lämpökäsittelyllä enemmän pehmenemistä hitsin mikrorakenteessa. Siistein juurikupu saatiin aikaan Coreweld 89 täytelangalla.

Hitsien kohdistuksessa on ollut hieman ongelmia kun tarkastellaan levyjen kohdistusta toisiinsa ja palojen paikkaa. Tämä on aiheuttanut ongelmia kovuusmittauksissa, vaadittua etäisyyttä 1,5 mm yläpinnasta ja alapinnasta ei ole voitu kaikissa tarkasti määrittää. Kaikki hitsisaumat ovat kuitenkin virheettömiä, eikä silmämääräisessä ja magneettijauhe tarkastuksessa löydetty pintapuolisia virheitä. Radiografisessa kuvauksessa ei löydetty kuin vähän huokosia ja osasta ei löydetty huokosia ollenkaan. Kaikki hitsit menivätkin hitsausvirheluokittelun mukaan B ja C-luokkaan.

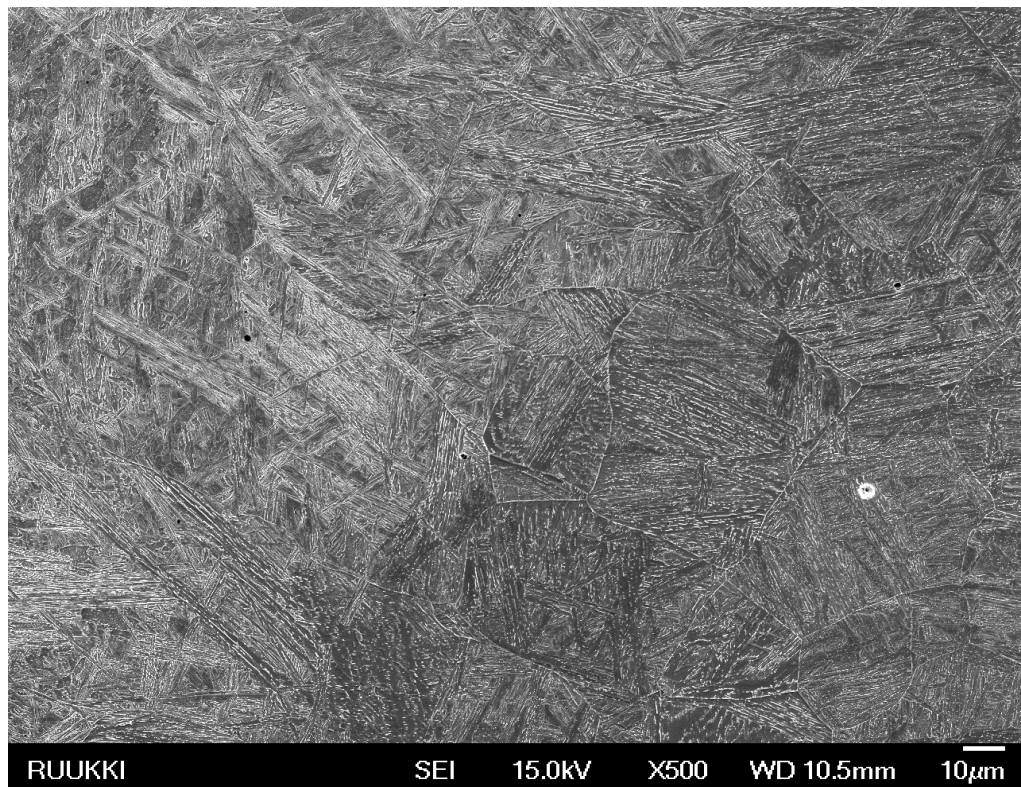
6.6. Mikrorakennetarkasteluja

Hitsiliitoksista tehtyjä mikrohie näytteitä tutkittiin Ruukin terästehtaalla FE-SEM laitteistolla. Mikrorakenteellisia eroja löydettiin sularajoilta ja lämpövaikutusalueen risteyskohdista. Rakenteellisiin muutoksiin on vaikuttanut suurimmaksi osaksi lämmöntuonti.

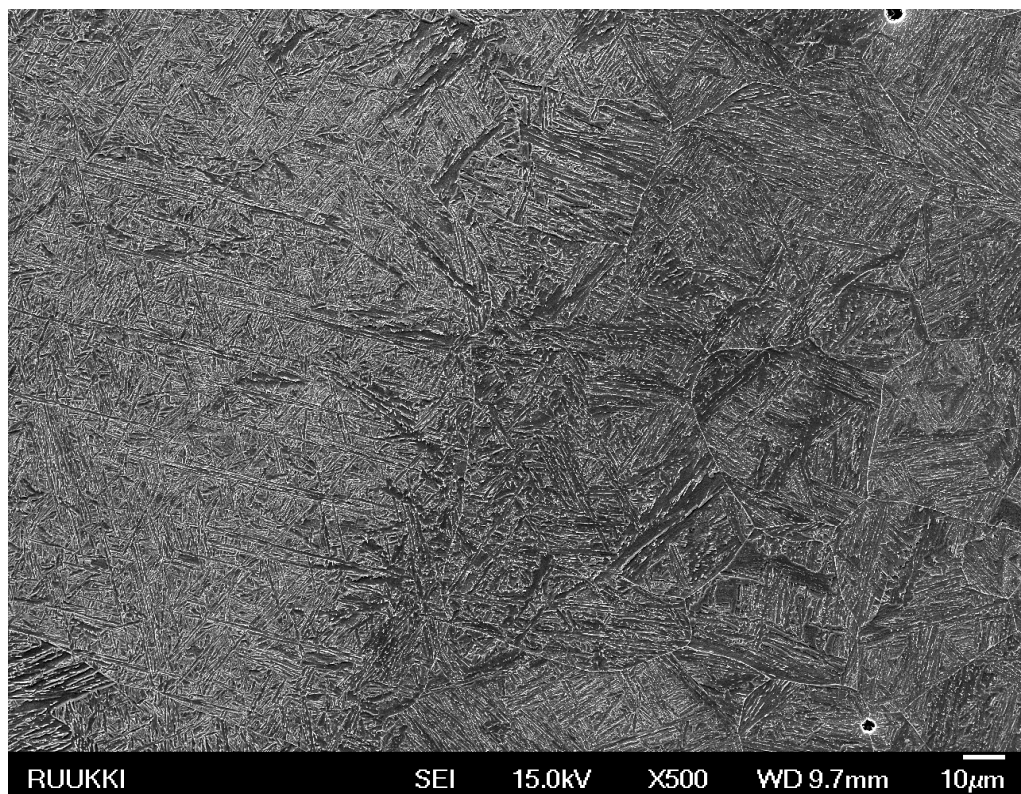
Seuraavaksi vertaillaan hitseistä otettuja FE-SEM kuvia ja niiden mikrorakenteita. Kuvia otettiin pintapalkon sularajalta, palkojen risteys kohdasta sekä pohjapalkon sularajalta. Kuvissa hitsiaine on vasemmalla ja sularaja sijoittuu kuvan keskelle, karkearakeinen HAZ kuvan oikealle puolelle.



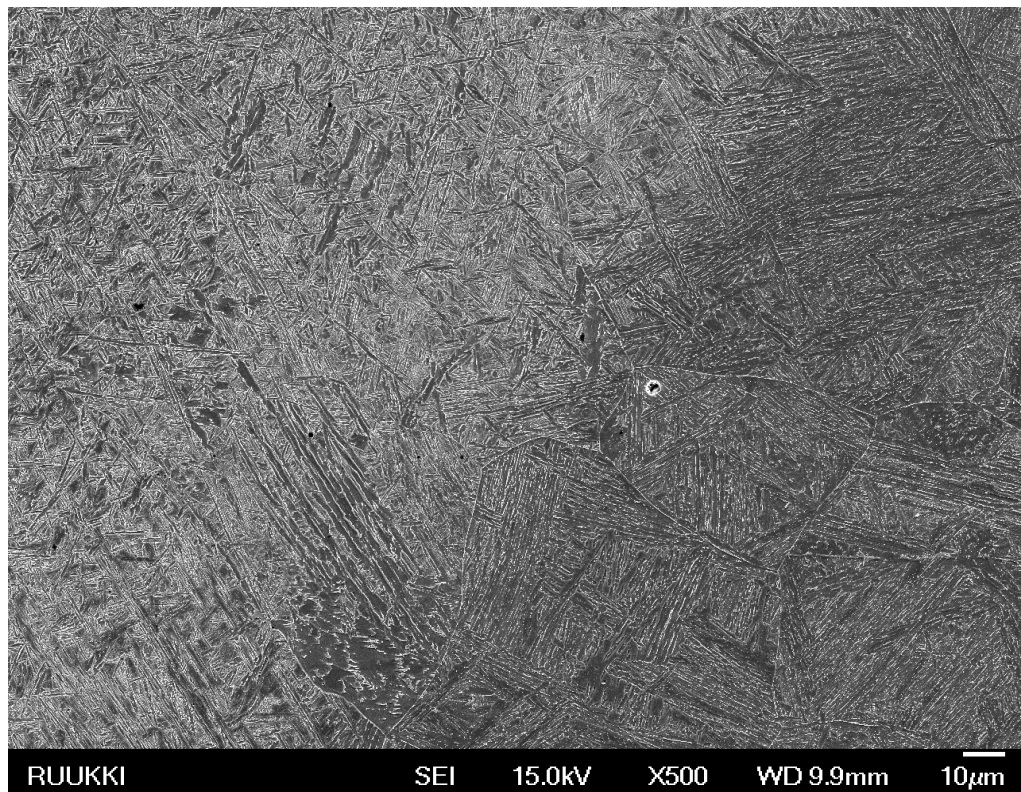
Kuva 58. (A) OK Autrod 12.51, pintapalkko FE-SEM kuva, hitsiaine vasemmalla



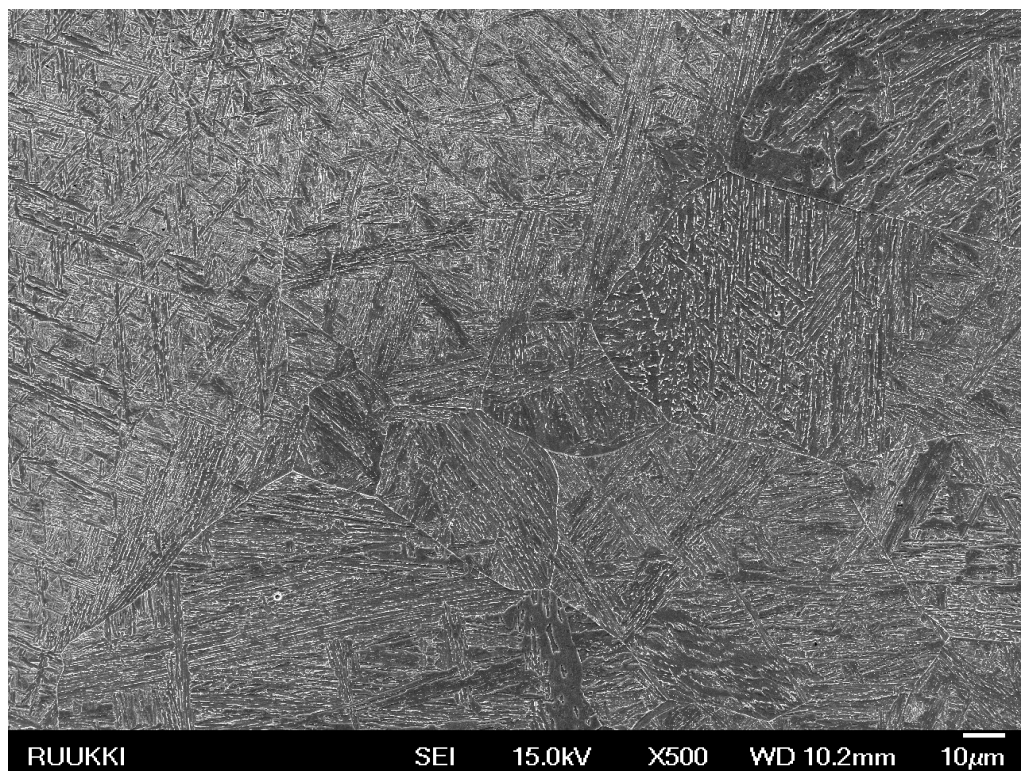
Kuva 59. (B) Union X96, pintapalko FE-SEM kuva



Kuva 60. (C) Aristorod 89, pintapalko FE-SEM kuva



Kuva 61. (D) Böhler X90-IG, pintapalko FE-SEM kuva.



Kuva 62. (E) Coreweld 89, pintapalko FE-SEM kuva.

OK Autrod 12.51 sularajan mikrorakenteeseen (kuva 58) on syntynyt tummempi kohta jossa on sileämpää mikrorakennetta enemmän kuin muissa FE-SEM kuvissa. Tämä johtuu alilujan hitsauslisäaineen erilaisesta koostumuksesta tasalujiin lisäaineisiin verrattuna. Karkearakeinen HAZ-alue on tyypillinen verrattuna muihin FE-SEM näytteisiin. Hitsien mikrorakenne-erot selittyvät hitsiaineiden erilaisista lisäainepitoisuuksista. Eri koostumuksilla syntyy erilaisia mikrorakenteita.

Kuvissa 59–62 on havaittavissa lähes identtiset pintapalon sularajan mikrorakennekuvat. Vasemmalla on martensiittista hitsiainetta, keskellä sularaja ja oikealla karkearakeinen HAZ. Tämähän todettiin myös kovuuskokeilla, sularajan kovuus noin 300HV ja karkearakeisen noin 350HV. Muutamassa kuvassa on havaittavissa sulkeumia (AlO₃ ja MnO), jotka analysoitiin SEM tarkastelun yhteydessä EDS:llä. Kaikkien ”tasalujien” lisäaineiden synnyttämät pintapalon mikrorakenteet ovat hyvin samankaltaisia. Huomattavampia eroavaisuuksia oli havaittavissa juuripalon sularajalla ja lämpövyöhykkeillä. Tarkempia tuloksia mikrorakenteista saataisiin tutkimalla näytteitä lisää ja alkuaineiden tarkka määrittäminen sularajalta ja HAZ-alueilta voitaisiin tehdä EDS-alkuaineanalysaattorilla. Todennäköisesti erot kuitenkin johtuvat hitsauksesta tulleista pienistä lämmöntuontieroista, vaikka tavoitteena olikin hitsata täysin identtiset hitsit.

7. YHTEENVETO

Suoritettujen hitsauskokeiden perusteella kaikilla ”tasalujilla” hitsauslisäaineilla saavutettiin valmistajien antamat mekaaniset ominaisuudet niin myötölujuudessa kuin murtolujuudessa. Saumojen tarkastusten jälkeen voitiin todeta, että lopputyössä tehdyt hitsit onnistuivat todella hyvin. Kun tutkimukset aloitettiin, huomattiin että palkojen sijainnilla on lievää merkitystä hitsien mekaanisiin ominaisuuksiin. Se onko palkot sattunut kohdakkain railossa, on vaikuttanut lämpökäsittelyyn joka on kohdistunut enemmän hitsisauman toiseen laitaan ja on aiheuttanut suuremmalla lämpökäsittelyllä enemmän pehmenemistä hitsin mikrorakenteessa. Hitsauskokeiden jälkeen huomattiin että ainakin kolme hitsisaumaa oli päässyt ”valumaan” läpi kupariseen juuritukeen mikä on aiheuttanut hitsin nopeampaa jäähtymistä. Valumat tapahtuivat Union X96, Aristorod 89 ja Böhler X90 lankojen hitsauksissa. Mahdolliset haittavaikutukset voitaisiin ehkä nähdä jos hitsaukset uusittaisiin kyseisten lankojen osalta.

Kovuusmittauksissa havaittiin, että kaikki ”tasalujilla” hitsatut liitokset ja niistä tehdyt kovuusprofiilit noudattivat perinteistä ultralujan Optim 960 QC hitsausliitosta, lukuun ottamatta Union X96 juuripalkoa. Kovuusprofiilien mittapisteiden sijainti on vaikuttanut todennäköisesti tuloksiin. Mittapisteet ovat sijoittuneet erikohtiin koska hitsatut levyt eivät ole olleet täysin suorassa toisiinsa nähden.

Vetokokeissa tulokset olivat suhteellisen tasaisia eikä suuria eroja syntynyt myötö- ja murtolujuuksissa. Valmistajien ilmoittamat mekaaniset ominaisuudet antoivat tutkimuksissa suuntaa, siitä minkälaisiin tuloksiin vähintään pyrittäisiin. Union X96 oli odotetusti testien paras ja toisen hyvän tuloksen antoi lisäainelanka Aristorod 89 jolla päästiin yli perusaineen nimellislujuuden 960 MPa. Perusaineen murtolujuus 1000 MPa saavutettiin myös kaikilla ”tasalujilla” lisäaineilla. Vetokoesauvojen murtopintojen tarkasteluissa ei löydetty huokosia. Murtumat olivat pääsääntöisesti syntyneet tasalujilla hitsauslisäaineilla sularajalle ja HAZ:iin, murtumat kohdistuivat oletettuihin paikkoihin koska ICHAZ oli hitsin pehmein kohta. Alilujassa OK Autrod 12.51 hitsisaumassa sen sijaan molemmat murtumat tulivat perusainetta pehmeämpään hitsiaineeseen.

Iskukokeissa jokaisesta hitsisaumasta iskettiin 9 iskukoesauvaa kolmesta eri loven paikasta. Kaikkien lankojen osalta tulos oli hyvä, rajaksi asetettu 14 joulea ylitettiin jokaisessa iskukoesauvassa. Huonoimmankin iskun keskiarvon osalta vaadittava 14 joulea

ylitettiin 17 joulella. Lopputyön osalta iskukokeiden tulokset olivat testauksien parasta osaluettua.

Taivutuskokeissa jokaiselle hitsisaumalle tehtiin kaksi pinta- ja juuritaivutusta. Alilujalla hitsiaineella tehdyt juuritaivutukset käyttäytyivät tavanomaisesti, taivutus jouduttiin keskeyttämään kesken koska perusainetta pehmeämpi hitsiaine antoi periksi. Juurihitsi oli pintataivutusta heikompi koska hitsilisäainetta on pinta-alallisesti vähemmän kuin pintapalossa. OK Autrod 12.51 pintataivutuksessa ja neljällä ”tasalujalla” hitsauslisäaineella päästiin pinta- ja juuritaivutuksissa vaadittuun 180°. Parhaimman taivutuskoe tuloksen antoi Union X96 langalla hitsattu sauma, neljästä saumalle tehdystä taivutuksesta vai yhteen juuritaivutus koeksuvaan oli tullut halkeama. Halkeama juuren puolelle on odotetumpi, koska hitsisauma on juuren puolelta alttiimpi taivutushalkeamille. Muilla langoilla halkeamia syntyi pääsääntöisesti HAZ:iin ja sularajalle, jotka ovat saumojen heikoimmat kohdat.

Hitsisaumojen mikrorakenne tutkimuksissa havaittiin, että pintapalojen sularajan mikrorakenteet ovat lähes identtiset. Pintapaloissa hitsiaine on martensiittista, sularajalta mentäessä kohti perusainetta tuli karkearakeinen HAZ. Tämä todettiin myös kovuuskokeilla ja niistä tehdyillä kovuusprofiileilla. Kaikkien ”tasalujien” lisäaineiden synnyttämät mikrorakenteet pintapaloissa ovat hyvin samankaltaisia. Hitsisaumojen juuripalojen mikrorakenteista sen sijaan löydettiin huomattavia eroavaisuuksia mikrorakenteissa, sularajalta ja karkearakeiselta HAZ alueelta. Esimerkiksi Union X96 juuripalon sularajalta ei havaittu karkearakeista HAZ aluetta tehdyissä SEM tutkimuksissa. Tarkempia tuloksia näistä eroavaisuuksista saataisiin tekemällä lisää FE-SEM tutkimuksia mikrohie näytteille ja ottamalla mikrorakenne kuvia laajemmalla alueelta.

8. LÄHDELUETTELO

/1/ AGA Oy, [www-sivu],

[http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/mison_gases],

23.5.2011.

/2/ Anttila, Tuomas, Ferriittisten ruostumattomien terästen hitsauksessa syntyvien mikrorakenteiden vaikutus lämpövyöhykkeen mekaanisiin ominaisuuksiin, [www-dokumentti],

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/24967/Anttila_Tuomas.pdf?sequence=1, 16.5.2011.

/3/ Esab Oy, MIG/MAG-hitsaus, [www-dokumentti],

[<http://www.esab.fi/fi/fi/education/processes-mig-gmaw.cfm>], 4.5.2011.

/4/ Esab Oy, [www-sivu], [<http://www.esab.fi/fi/fi/news/upload/HU-1-11.pdf>], 4.5.2011.

/5/ Esab Oy, Lukkari, Juha, Hitsien laatu ja hitsausvirheet, [www-dokumentti],

http://www.haka-kone.fi/kuvat/esab/Hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf, 22.9.2011.

/6/ Hitsaustekniikka 02/2011, Kumpulainen Jani, Tihinen Sakari, Laitinen Risto,

Ultralujien terästen hitsaus uusilla MAG menetelmillä, [pdf-dokumentti], 4.5.2011.

/7/ Hitsaustekniikka 01/2009, Rautaruukki Oyj, Ruukin kuumavalssattujen Optim QC -

rakenneterästen hitsaus, [pdf-dokumentti], 4.5.2011.

/8/ Kauppi, Jaana, FE-SEM- ja EDS-laitteiden käyttöönotto, [www-dokumentti],

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/29939/Kauppi_Jaana.pdf?sequence=1, 27.5.2011.

- /9/ Kemppi Oy, [www-dokumentti],
[[http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/documents/62F33D33B3169C76C225724300264B0A/\\$file/ProNews_3_06_FI.pdf](http://www.kemppi.com/inet/kemppi/contman.nsf/documents/62F33D33B3169C76C225724300264B0A/$file/ProNews_3_06_FI.pdf)], 4.5.2011.
- /10/ Kyröläinen Antero, Lukkari Juha, Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus, 2.painos, MET, 2002.
- /11/ Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Laserhitsaus [www-dokumentti],
[<http://www.lut.fi/fi/technology/lutmechanical/research/laser/prosessit/laserhitsaus/Sivut/Default.aspx>], 3.5.2011.
- /12/ Lepola, Pertti, Makkonen, Matti, Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet, 1.-3, painos, WSOY, 2005.
- /13/ Lukkari Juha, Hitsaustekniikka – Perusteet ja kaarihitsaus, 3.painos, Oy Edita Ab, 1998.
- /14/ Rautaruukki Oyj, Tekninen asiakastuki, Kuumavalssatut teräslevyt ja kelat, [www-dokumentti],
[[http://www3.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/F0DB17FD0B50A3CDC2257735003F7319/\\$File/Optim%20QC_HR%202%201%2023%2006%202010_FI.pdf?openElement](http://www3.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/F0DB17FD0B50A3CDC2257735003F7319/$File/Optim%20QC_HR%202%201%2023%2006%202010_FI.pdf?openElement)], 2.5.2011.
- /15/ Rautaruukki Oyj, Erittäin lujat muovattavat teräkset, [www-dokumentti],
[<http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Metal-coated-coils-and-sheets/Erittain-luja-muovattava-Litec-teras/#tab3>], 31.5.2011.
- /16/ Rautaruukki Oyj, Kuumavalssatut teräslevyt ja kelat, [www-dokumentti],
[<http://www.ruukki.fi/~media/Finland/Files/Terastuotteet/Ruukki-Kuumavalssatut-ter%C3%A4kset-Hitsaus-ohjelehti.pdf>], 22.9.2011.
- /17/ SFS-EN 10045-1, standardi, Suomen Standardisoimisliitto, 1990.

/18/ SFS-EN 10002-1, standardi, Suomen Standardisoimisliitto, 2002.

/19/ SFS-EN 1321:1996, standardi, Suomen Standardisoimisliitto, 1997.

/20/ Siik, Henri, Aineenkoetuslaboratorion tuotannonohjaus- ja raportointijärjestelmä, [www-dokumentti],
<https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8772/Siik.Henri.pdf?sequence=2>,
16.5.2011.

/21/ Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. Hitsauksen materiaalioppi. 1.painos.
Oriveden kirjapaino. 2004.

/22/ Tampereen teknillinen yliopisto Materiaaliopin laitos, Vickersin kovuuskoe, [www-dokumentti], [http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_7.php], 6.5.2011.

/23/ Tihinen, Sakari, Työpaketti 3 Insinööri työ, [ppt-tiedosto], 4.5.2011.

/24/ Ylikangas, Risto, Kokoonpanossa hitsattavien siltahitsien vaikutus rakenteen lopullisiin ominaisuuksiin ultralujalla Optim 960 QC -teräksellä, [www-dokumentti], [<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/50512/nbnfi-fe200911302382.pdf?sequence=3>], 4.5.2011.

/25/ Zwick GmbH & Co, Zwick Roell PSW 750, [www-dokumentti], [<http://global.zwick.com/fi/tuotteet/iskuvasarat/psw-750-pendulum-impact-testers-up-to-750-joules.html>], 30.5.2011.

9. LIITELUETTELO

Liite 1	Vetokoneen tekniset tiedot
Liite 2	Iskuvasaran tekniset tiedot
Liite 3	Röntgentarkastus pöytäkirja
Liite 4	Hitsausarvojen seurantapöytäkirjat (pWPS)
Liite 5	Iskukoe tulokset pöytäkirja

LIITE 1**(1/1)**

Zwick Allround-floor Z250kN vetokoneen tekniset tiedot.

- Zwick Z250 Allround koetuskone
 1. koetustila leveys x korkeus 1030x2115mm
 2. Koetusnopeus portaattomasti säädettävissä 0,00005...600mm/min
- Säädettävä alempi palkki, työskentelykorkeuden säätö
- 250kN voima-anturi
 1. Tarkkuusluokka 1 alueella 500N-250kN
 2. Tarkkuusluokka 0,5 alueella 2500N-250kN
 3. Tarkkuusluokat ISO EN 7500-1 standardin mukaan
- 50kN voima-anturi
 1. Tarkkuusluokka 1 alueella 20N-50kN
 2. Tarkkuusluokka 0,5 alueella 100N-50kN
 3. Tarkkuusluokat ISO EN 7500-1 standardin mukaan
 4. Kalibrointisertifikaatti ISO EN 7500-1 standardin mukaan
- 250kN hydrauliset kiinnittimet
 1. Yksipuoleiset hydrauliset kiinnittimet (Single-sided)
 2. Kaksipuoleiset hydrauliset kiinnittimet, max. 480 bar
- Leukapala-adapterit
- Leukapalat pyörösauvoille Ø10...59mm
- 3-piste taivutus, Fmax 250kN
- Puristustyökalut, Fmax 250kN
- Makro-extensiometri
 1. Tarkkuusluokka 0,5 EN ISO 9513 mukaan
- Poikittaisvenymäanturi
 1. 2 mittauslinjaa
 2. Resoluutio 0,05µm
- Inkrementaalinen Clip –on extensiometri
 1. Tarkkuusluokka 0,5 EN ISO 9513 mukaan
- Videotallennus kameralla
 1. Koetuksen kuvaaminen ja oikea-aikainen toisto myöhemmin simulaatiossa ja tulosten tulkinnassa
- Olosuhdekammio -80...+250°C
 1. Jäähdytys nestemäisellä typellä LN2 ja ilmakiertopuhaltimella
 2. 3 lämpöelementtiä

LIITE 2**(1/1)**

Zwick Roell PSW 750 instrumentoidun iskuvasaran tekniset tiedot.

- Zwick Roell PS750
- Iskuvasara 750J
- Instrumentoitu iskukärki EN 10045 ja ASTM E23 mukaisesti
- Vasara 450J-750J ja 600J-750J
- Iskuvasara Charpy koetukseen EN 10045 ja ASTM E23 mukaisesti
- Täysinautomaattinen näytteiden syöttölaitteisto Zwick iskuvasaroille
- Näytteiden mitat 5-10mm x 100mm x 55mm
- Lämpötila-alue -180... +300°C
- Olosuhdekammio, max. 21 näytettä
- Jäähdytys nestemäisellä typellä
- näytteen asemointi ja keskityslaite
- Koekappaleiden automaattinen poistaminen koetilasta
- Lajittelija hyväksytyille ja hylätyille koekappaleille
- Varusteet iskuvetolujuuden testaamiseen 300J asti
- TestXpert testiohjelmalla
- Ohjelmisto iskuvasaralle
- koekappaleen syöttölaitteelle
- Tulosten käsittely ja simulointi mahdollisuus
- Tulokset voidaan siirtää eri tiedostomuotoihin (MS Excel, MS Word, MS Power Point, PDF-muoto)

(1/1)

Radiografinen tarkastus pöytäkirja

DEKRA Industrial Oy		Radiografinen tarkastus	
PL 41, 01621 VANTAA			
Laaajantien tie 3, 01620 VANTAA			
Tel. 0203 87843 Fax (09) 878 6653			
		Pöytäkirjan nro Report No. HC06466	

Tilaja Contractor Rautaruukki Oy	Työnro Work No. 555/2011	Asiakas Customer Rautaruukki Oy	Työnro Work No. -
Laitos Station Tutkimuslaitos		Valmistaja, asentaja Manufacturer, installed by Rautaruukki Oy	Työnro Work No. -
Tarkastuskohde Inspection object Hitsauskoe 10 kpl		Piirustus nro Drawing No. -	

Hitsausprosessi Welding process 135 MAG		Perustaine Base material OPTIM 960 QC	
Liitosmuoto Joint type BW	Railion muoto Welding preparation V	Lämpökäsittely Heat treatment Ei lämpökäsittelyä	

Merkintätapa Marking Lyijymerkit		Kuvaskaavio Inspection chart -	
Säteilylähde Radiation source Andrex Smart 300/3	Koko Size 1,6X1,6	ID PT 104	Indikaattorin tyyppi ja sijoitus Type and location of IQI W 10 Fe S - Säteilylähteen puolella Source side F - Filmin puolella Film side
Filmi ja vahvistuslevy Film and intensifying screen Agfa D5 + 0,027 Pb	Kehitystapa Processing technique Koneellinen, 28 °C		

Kuvaustekniikka Inspection technique (EN 1435) 1. Levykuvaus Single wall penetration (fig. 1)		5. Elliptinen kuvaus Elliptic technique (fig. 11)	
2. Sektorikuvaus ulkopuolelta Source located outside and film inside (fig. 2)		6. Kohtisuora kuvaus Perpendicular technique (fig. 12)	
3. Keskeiskuvaus Source located centrally inside and film outside (fig. 5)		7. Sektorikuvaus kahden seinämän läpi Double wall penetration single image (fig. 14)	
4. Sektorikuvaus sisäpuolelta Source located inside and film outside (fig. 8)		8. Eri aineenpaksuudet Different material thicknesses (fig. 19)	
Kuvauspvm Insp. date 21.09.2011	Kuvauspaikka Inspection place Raah	Kuvaa(j)t Inspector(s) Esa Ylitälo	Pätevyys Qualification EN 473/Nordtest

Tarkastusohje Insp. procedure SFS-EN 1435		Tarkastuslaajuus Extent of inspection 100 %	
Laadunmääritysasiakirja Quality document SFS-EN 287-1		Lastuvastimus Quality requirement SFS-EN ISO 5817 B (kuvat C)	

Kuvan tunnus Film ID	Nro No.	Ulkoishalk. O.D. [mm]	Seinäämä Wall [mm]	Jännite Voltage [kV]	Valotus Exposure [min]	SFD [mm]	Kuv. tekn. Examn. tech.	Ind. sij. IQI loc.	Ind.lanka IQI wire	Mustuma Density min/max	Virhetyyppi Imperfection type	Hyv. Acc.	Hylj. Rej.	Hitsaaja/ Huomaus Welder/ Remarks
A1			6,0	185	30s	750	1	S	16	2,4-3,4	B 2011			
A2			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	C 2011			
B1			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B			
B2			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011			
C1			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B			
C2			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	C 2011			
D1			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011			
D2			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 2011			
E1			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 504			
E2			"	"	"	"	"	"	16	2,4-3,4	B 504			

100 - Hakeama Crack; 2011 - Huokonen Gas pore; 2012 - Tasainen hiekkaisuus Uniformly distributed porosity; 2013 - Hiekkorynnäly Clustered porosity; 2014 - Hitsausporo Linear porosity; 2018 - Pitkäsuonainen hitsauksen Elongated cavity; 2019 - Madonnakiikastausten Worm-hole; 2024 - Insuuleista Crater pipe; 501 - Kuurauskuoppa Sag inclusion; 5011 - Juurensivun puuttuminen Tongue-like inclusion; 401 - Liianvähäinen Lack of fusion; 402 - Vähevä hitsauslaatu Weakness Lack of penetration; 5015 - Jälkevä kuurauskuoppa Continues underroot; 5012 - Kalkinhuuhtelu neulaava Incomplete underroot; 5013 - Juurenpuolen neulaava Shrinkage groove; 502 - Kahkea kupu Excess weld metal; 504 - Kahkea juurikuoppa Excess penetration; 510 - Loppukuoppa Root Bum through; 511 - Vähevä kupu Incompletely filled groove; 515 - Vähevä juuri Root once vity; 517 - Uudelleentallottune Poor repair

Huomautukset Notes

Liitteet Appendix 0 sivua pages

Luckittelija Interpreter Esa Ylitälo	<div> PT 722 Esa Ylitälo Nordtest 8581</div>	Pätevyys Qualification <input checked="" type="checkbox"/> EN 473/Nordtest Level 2 <input type="checkbox"/> SNT-TC-1A Level 2 <input type="checkbox"/> STUK	<div> Helsinki Accreditation Service ISO 9001:2015 / ISO 14001:2015 Type A</div>
Pvm ja allekirjoitus Date and signature 21.9.2011			
Rev. 3			

LIITE 4

(5/1)

pWPS: OK Autrod 12.51

pWPS no:				Kappale nro: Item no:			Hitsausprosessi: Welding process:			pMAG
Perusaineen sulatusnumero: Base material heat number:				Perusaine: Base material:			Hitsin pituus (mm): Weld length (mm):			
29494-041				Oprim 960 QC			500mm			
Lisäaineen: Filler material:				Lisäaine: Filler material:			Langan Ø (mm): Wire Ø (mm):			
Heat no:				OK Autrod 12.51			1,2			
Lot no:				Jauhe: Flux:			Kaasun virtaus (l/min): Gas flow (l/min):			
FT921AE0366										
Jauheen: Flux:				Kone: Welding equipment:			Suutin Ø: Nozzle Ø:			
Lot no:				Gloos quinto 603			1,2			
Hitsari: Welder:				Pvm: Date:			9.9.2011			
A.Vimpari										
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Kuva railosta</div> <div>Kuva liitoksesta</div> </div>							Lisätiedot: Details:			
Palko nro Run no	Virta Current (A)	Kaarijännite Voltage (V)	Langansyöttönopeus Wire feed rate (m/min)	Kuljetusnopeus Travel speed (mm/min)	Aloitustempötila Start temperature (°C)	Suutinetäisyys Nozzle distance (mm)	Kaarienergia Arc energy E (kJ/mm)	Kallistus- kulma Angle of bank (°)	Vajaata Incomplement weld (mm)	
Juuri										
TP3 2.2	272	21,3	9,6	1000		14	0,35			
Pinta										
TP3 2.2	271	21,1	9,55	610		14	0,56			
							#JAKO/0!			
Juuri										
TP3 2,3	274	21,2	9,6	1000		14	0,35			
Pinta										
TP3 2,3	272	21,1	9,6	610		14	0,56			

LIITE 4

(5/2)

pWPS: OK Aristorod 89

pWPS no:			Kappale nro: Item no:			Hitsausprosessi: Welding process:			pMAG	
Perusaineen sulatusnumero: Base material heat number:			Perusaine: Base material:			Hitsin pituus (mm): Weld length (mm)			500	
Lisäaineen: Filler material:			Lisäaine: Filler material:			Langan Ø (mm): Wire Ø (mm):			1,2	
Heat no:			OK Aristorod 89			Kaasun virtaus (l/min): Gas flow (l/min):				
Lot no:			PV120246980B			Suutin Ø: Nozzle Ø:			1,2	
Jauheen: Flux:			Kone: Welding equipment:			Gloos Quinto 603				
Lot no:			Jauhe: Flux:			Hitsari: Welder:			26.8.2011	
			A.Vimpari							
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Kuva raillosta</div> <div>Kuva liitoksesta</div> </div>						Lisätiedot:				
						Details:				
						Kaasu:mison 25				
Palko nro Run no	Virta Current (A)	Kaarijännite Voltage (V)	Langansyöttö- nopeus Wire feed rate (m/min)	Kuljetusnopeus Travel speed (mm/min)	Aloitustempötila Start temperature (°C)	Suutinetäisyys Nozzle distance (mm)	Kaarienergia Arc energy E (kJ/mm)	Kallistus- kulma Angle of bank (°)	Vajaata Incomplement weld (mm)	
juuri										
TP3 1,6	274	21,5	9,6	1000		14	0,35			
pinta										
TP3 1,6	271	21,1	9,6	610		14	0,56			
							#JAKO/0!			
juuri										
TP3 1,7	274	21,1	9,6	1000		14	0,35			
pinta										
TP3 1,7	276	21	9,6	610		14	0,57			

LIITE 4

(5/3)

pWPS: Böhler X90-IG

pWPS no:			Kappale nro: Item no:			Hitsausprosessi: Welding process:			pMAG		
Perusaineen sulatusnumero: Base material heat number:			Perusaine: Base material:			Hitsin pituus (mm): Weld length (mm)			500		
Lisäaineen: Filler material:			Lisäaine: Filler material:			Langan Ø (mm): Wire Ø (mm):			1,2		
Heat no: 311296			Böhler X 90-IG			Kaasun virtaus (l/min): Gas flow (l/min):					
Lot no:			Jauhe: Flux:			Suutin Ø: Nozzle Ø:			1,2		
Lot no:			Kone: Welding equipment:			30.8.2011					
Lot no:			Gloos Quinto 603								
Lot no:			Hitsari: Welder:								
Lot no:			A.Vimpari								
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Kuva railosta</div> <div>Kuva liitoksesta</div> </div>						Lisätiedot: Details:					
						Kaasu: mison 25					
Palko nro Run no	Virta Current (A)	Kaarijännite Voltage (V)	Langansyöttönopeus Wire feed rate (m/min)	Kuljetusnopeus Travel speed (mm/min)	Aloitustempötila Start temperature (°C)	Suutinetäisyys Nozzle distance (mm)	Kaarienergia Arc energy E (kJ/mm)	Kallistus- kulma Angle of bank (°)	Vajaata Incomplement weld (mm)		
juuri											
TP3 1,8	268	21,5	9,55	1000		14	0,35				
pinta											
TP3 1,8	276	21	9,55	610		14	0,57				
							#JAKO/0!				
juuri											
TP3 1,9	270	21,5	9,55	1000		14	0,35				
pinta											
TP3 1,9	270	21,5	9,55	610		14	0,57				

LIITE 4

(5/4)

pWPS: Coreweld 89

pWPS no:				Kappale nro:				Hitsausprosessi:			
				Item no:				Welding process:		pMAG	
Perusaineen sulatusnumero:				Perusaine:				Hitsin pituus (mm):			
Base material				Base material:		optim 960QC		Weld lenght (mm)		100	
Lisäaineen:				Lisäaine:				Langan Ø (mm):			
Filler material:				Filler material:		Coreweld 89		Wire Ø (mm):		1,2	
Heat no:				Jauhe:				Kaasun virtaus (l/min):			
Lot no:		PV1080191		Flux:				Gas flow (l/min):			
Jauheen:				Kone:				Suutin Ø:			
Flux:				Welding equipment:		Gloos Quinto603		Nozzle Ø:		1,2	
				Hitsari:							
				Welder:		A.Vimpari				1.9.2011	
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Kuva raillosta</div> <div>Kuva liitoksesta</div> </div>								Lisätiedot:			
								Details:			
Palko nro	Virta	Kaarijännite	Langansyöttö-	Kuljetusnopeus	Aloitustemp.	Suutinetäisyys	Kaarienergia	Kallistus-	Vajaata		
Run no	Current (A)	Voltage (V)	Wire feed rate (m/min)	Travel speed (mm/min)	Start temperature (°C)	Nozzle distance (mm)	Arc energy E (kJ/mm)	Angle of bank (°)	Incomplement weld (mm)		
Juuri											
TP3 2,0	247	21,8	9,2	1000		14	0,32				
Parametrit ws9,25 pf 200hz bc 70 pt 1,3ms pv 33,5 ilmarako 0.5 . Lopussa 50mm liikaa läpi muuten hyvä											
							#JAKO/0!				
Pinta											
TP3 2,0	255	22,3	9,6	610		14	0,56				
							#JAKO/0!				
Juuri											
TP3 2,1	246	21,9	9,2	1000		14	0,32				
lopussa 50mm liikaa läpi muuten ok.											
							#JAKO/0!				
Pinta											
TP3 2,1	250	22,6	9,6	610		14	0,56				

LIITE 4

(5/5)

pWPS: Union X96

pWPS no:			Kappale nro: Item no:			Hitsausprosessi: Welding process:			pMAG	
Perusaineen sulatusnumero: Base material heat number:			Perusaine: Base material:			Hitsin pituus (mm): Weld lenght (mm)			500	
29494-041			Optim 960QC							
Lisäaineen: Filler material:			Lisäaine: Filler material:			Langan Ø (mm): Wire Ø (mm):			1,2	
Heat no: 822910			Union x96							
Lot no:			Jauhe: Flux:			Kaasun virtaus (l/min): Gas flow (l/min):				
Jauheen: Flux:			Kone: Welding equipment:			Suutin Ø: Nozzle Ø:			1,2	
Lot no:			Gloos Quinto 603							
			Hitsari: Welder:			Pvm: Date:			25.8.2011	
			A:Vimpari							
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div>Kuva railosta</div> <div>Kuva liitoksesta</div> </div>						Lisätiedot: Details:				
Palko nro Run no	Virta Current (A)	Kaarijännite Voltage (V)	Langansyöttönopeus Wire feed rate (m/min)	Kuljetusnopeus Travel speed (mm/min)	Aloitustempötila Start temperature (°C)	Suutinetäisyys Nozzle distance (mm)	Kaarienergia Arc energy E (kJ/mm)	Kallistus- kulma Angle of bank (°)	Vajaata Incomplement weld (mm)	
Juuri										
TP3 1.2	275	22,5	9,55	1000		14	0,37			
Pinta										
TP3 1.2	277	21,1	9,55	610		14	0,57			
Parametrit: Ws9,6 Pf205Hz Bc 77A Pt 1,3ms Pv34,5										
							#JAKO/0!			
Juuri										
TP3 1.3	277	22,6	9,55	1000		14	0,38			
Pinta										
TP3 1.3	276	21,1	9,55	610		14	0,57			
Samat parametrit										

LIITE 5

Iskukoe tulokset pöytäkirja.

SuRO iskukokeet TP3			pvm. 25.10.2011				
Vasara: 300J	Sauvan koko: 5x10x55						
Hitsauslisäaine	Loven paikka	Sauva	Iskukoetulos (J)	ka (J)	Lämpötila (°C)	poikki	huokosta murtumassa
Union X96	VWT 0/1	1	26,501	31	-40	X	
Union X96		2	40,103		-40		
Union X96		3	26,409		-40	X	
Union X96	VHT 0/1	1	23,798	42	-40		
Union X96		2	62,245		-40		
Union X96		3	38,804		-40	X	
Union X96	VHT 1/1	1	50,539	57	-40		
Union X96		2	61,171		-40		
Union X96	VHT 1/1	3	58,759	57	-40		
Aristorod 89	VWT 0/1	1	38,526	39	-40	X	
Aristorod 89		2	44,463		-40	X	
Aristorod 89		3	33,207		-40	X	
Aristorod 89	VHT 0/1	1	68,835	44	-40		
Aristorod 89		2	31,702		-40	X	
Aristorod 89		3	32,782		-40	X	
Aristorod 89	VHT 1/1	1	50,387	52	-40		
Aristorod 89		2	43,705		-40	X	
Aristorod 89	VHT 1/1	3	61,657	52	-40		
Böhler X90	VWT 0/1	1	50,159	45	-40	X	
Böhler X90		2	37,108		-40	X	
Böhler X90		3	47,378		-40	X	
Böhler X90	VHT 0/1	1	34,371	58	-40	X	
Böhler X90		2	76,356		-40		
Böhler X90		3	63,254		-40		
Böhler X90	VHT 1/1	1	64,043	63	-40		
Böhler X90		2	64,844		-40		
Böhler X90	VHT 1/1	3	59,609	63	-40		
Coreweld 89	VWT 0/1	1	43,602	42	-40	X	
Coreweld 89		2	41,621		-40	X	
Coreweld 89		3	40,981		-40	X	
Coreweld 89	VHT 0/1	1	45,047	32	-40	X	
Coreweld 89		2	25,983		-40	X	
Coreweld 89		3	24,688		-40	X	
Coreweld 89	VHT 1/1	1	70,741	65	-40		
Coreweld 89		2	70,488		-40		
Coreweld 89	VHT 1/1	3	52,298	65	-40		
Autrod 12.51	VWT 0/1	1	-	42	-40	Hylätty	
Autrod 12.51		2	42,695		-40	X	
Autrod 12.51		3	40,84		-40		
Autrod 12.51	VHT 0/1	1	65,061	54	-40		
Autrod 12.51		2	43,23		-40		
Autrod 12.51		3	54,202		-40		
Autrod 12.51	VHT 1/1	1	61,92	59	-40	X	
Autrod 12.51		2	41,265		-40	X	
Autrod 12.51	VHT 1/1	3	72,811	59	-40		